

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

SERIE
ALLGEMEINE
RELATIVITÄTS-
THEORIE

Sind
Zeitreisen
möglich?



MÄRZ 2016

ARCHÄOLOGIE
Die Geburt der
Stadt

AMAZONIEN
Staudamm bedroht
Ökosystem

CHEMIE IM ALLTAG
Die Geheimtinten
der CIA

GRUPPENTHEORIE

Der größte Beweis der Mathematik



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



4 1 19 0038 4 032 01



SciViews

Die besten Wissenschaftsvideos im Netz.

SciViews ist das neue Videoportal von **Spektrum der Wissenschaft** und zeigt die besten Webvideos rund um Wissenschaftsthemen. Vorgestellt werden sie von unseren Redakteuren, von Fachjournalisten und von Wissenschaftsbloggern. Ob Clips zu Raumfahrtmissionen, Animationen zur Genetik oder Beiträge von Forschungseinrichtungen, die ihre Arbeit mit bewegten Bildern vorstellen – auf SciViews reicht das Themenspektrum von Astronomie über Biologie, Geologie, Medizin, Hirnforschung und Psychologie bis hin zur Physik.

www.SciViews.de

*Ebenfalls auf SciViews:
die besten Videos unserer nationalen und internationalen Medienpartner*

HZB
Helmholtz
Zentrum Berlin

universität
innsbruck



LINDAU
NOBEL LAUREATE
MEETINGS

nature

dasgehirn.info
Der Kosmos im Kopf



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Die Digital-Debatte geht weiter

Die »Neue Zürcher Zeitung« wünschte dem »intellektuell anregenden Text« ein möglichst großes Echo. Die »Süddeutsche Zeitung« nannte es »verdienstvoll, dass jetzt eine Gruppe renommierter Wissenschaftler vor einer ungesteuerten Digitalisierung warnt«. Für die »Zeit« leitet der Beitrag schlüssig her, wie Technologien »auch pluralistische Gesellschaften in digitale Leviathane verwandeln könnten«. Und die »Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung« schließlich pflichtete der Forderung bei, »das Wissen um die manipulative Dimension des Internets zu einem Bildungsziel zu erheben«.

Keine Frage: Die große Resonanz in den Leitmedien hat die Wirkung des Digital-Manifests neun namhafter Autoren noch verstärkt, das wir in unserer Januarausgabe publizierten. »Scientific American« und seine internationalen Ausgaben werden in Kürze Übersetzungen ins Englische, Spanische und in weitere Sprachen veröffentlichen; auch das wird die wichtige Diskussion um unsere digitale Zukunft weitertragen. Jetzt ist die Politik am Zug: Trotz aller drängenden aktuellen Probleme müssen unsere Abgeordneten gewahr werden, dass mit dem historisch einmaligen Missbrauchspotenzial bestimmter, im Digital-Manifest benannter Technologien inklusive »Big Nudging« eine schleichende Gefahr für Freiheit und Demokratie einhergeht.

Wie vor zwei Ausgaben angekündigt, setzt »Spektrum« die Berichterstattung fort. So publizieren wir auf »Spektrum.de« weitere Einschätzungen von ausgewiesenen Experten. Auszüge aus drei der bisher dort erschienenen Interviews und Kommentare finden Sie ab S. 18 in diesem Heft.

Teile der angestoßenen Debatte kreisen speziell um die Frage, wie leistungsfähig künstliche Intelligenzen in absehbarer Zukunft noch werden dürften. Das Digital-Manifest warnte hier vor Risiken durch selbstständig lernende KI-Systeme. In seinem Artikel ab S. 78 unternimmt der französische Informatiker Jean-Paul Delahaye eine nüchterne Bestandsaufnahme, indem er heutiges maschinelles Vermögen systematisch mit dem menschlichen vergleicht. Eine lohnende Lektüre!

Und noch ein Hinweis in eigener Sache: Unser Kolumnist Roald Hoffmann zieht sich aus Altersgründen vom Schreiben zurück. Ab sofort werden Matthias Ducci und Marco Oetken für Chemische Unterhaltung sorgen. Statt theoretischer Betrachtungen stellen die beiden Didaktiker aus Karlsruhe beziehungsweise Freiburg Experimente zum Nachkochen in den Mittelpunkt der beliebten Rubrik. Auf diese Weise hoffen wir, künftig für noch mehr Spaß an der Chemie zu sorgen!

Herzlich grüßt Ihr

Carl Hönig

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Die französische Biochemikerin **Valérie Daugé** erforscht am Institut Micalis die Zusammenhänge von Ernährung, Darmflora und Stoffwechselstörungen – insbesondere mit Blick auf Hirnfunktionen und psychische Erkrankungen (S. 20).



Scott O'Neill hat einen Traum: Er will das Denguefieber, eine tropische Seuche, ausmerzen. Dazu züchtet der Leiter der internationalen Initiative »Eliminate Dengue« Stechmücken, die das Virus nicht mehr übertragen können, und setzt sie frei (S. 28).



Bislang suchten vor allem Ägyptologen und Prähistoriker den Rat der Wiener ¹⁴C-Experten **Walter Kutschera** und **Eva Maria Wild**. Neuerdings gehört auch die Mordkommission dazu (S. 62).

3 Editorial

6 Spektrogramm

Frühe Arktisbewohner • Grönlands Eisschild schrumpft unter Nachtwolken • Fleisch fressende Pflanzen können zählen • Zuckerstoff hilft bei Wasseraufbereitung • Mäuse mögen Gedränge • Hinweise auf Planet Neun

9 Bild des Monats

Erdaufgang über Mondkratern

10 Forschung aktuell

Angekündigte Supernova
Sternexplosion erscheint mehrmals nacheinander

Personalisierte Ernährung
Nahrungsmittel wirken individuell anders

Beweis der ABC-Vermutung
Seit drei Jahren liegt er vor, aber keiner versteht ihn

SPRINGER'S EINWÜRFE
Wettrüsten der Geschlechtsorgane
Penisformen kontra weibliche Abwehrstrategien

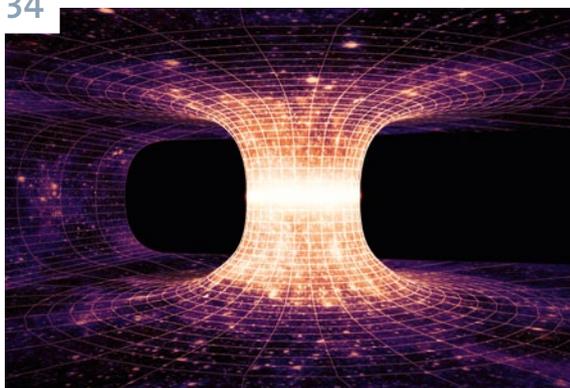
18 Das Digitalmanifest – Expertenstimmen
Auszüge aus Interviews und Kommentaren

28



BILL MAYER

34



ISTOCK / KTSIMAGE

56



MIT FFDL, GEN. DER FOUILLE FRANCO-SYRIENNE DE TELL ASHWAD, CODIRECTION DANIELLE STORDEUR ET BASSAM JAMMOUS, MISSION EL KOWM-MUREYBET DU MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES FRANCE; FOTO: L. DUGUÉ

BIOLOGIE & MEDIZIN

20 Wenn der Bauch das Gehirn krank macht

Depression, Autismus und weitere psychische Erkrankungen könnten mit einer bestimmten Darmflora einhergehen.

Valérie Daugé, Mathilde Jaglin, Laurent Naudon und Sylvie Rabot

28 Stoppt das Denguefieber!

Mit Hilfe eines Bakteriums machen Forscher Stechmücken gegen das Denguevirus immun.

Scott O'Neill

PHYSIK & ASTRONOMIE

SERIE »100 JAHRE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE« TEIL 6

▶ 34 Sind Zeitreisen möglich?

In die Zukunft können wir uns bereits bewegen. Besuche in der Vergangenheit wären deutlich kniffliger.

Tim Folger

40 Hier irrte Einstein

Jeder macht mal Fehler. Aber selten sind sie so aufschlussreich wie die des legendären Physikers.

Lawrence M. Krauss

SCHLICHTING!

46 Wie sich Spinnennetze spannen

Eine Flüssigkeitshülle hält das Seidengeflecht in Form.

H. Joachim Schlichting

MENSCH & KULTUR

SERIE »DIE GEBURT DER STADT« TEIL 1

▶ 56 Frieden stiftende Ahnen

Vor 9500 Jahren formten Tausende von Menschen die ersten Großsiedlungen. Drohende Konflikte bekamen sie mit Ritualen und Regeln in den Griff.

Marion Benz

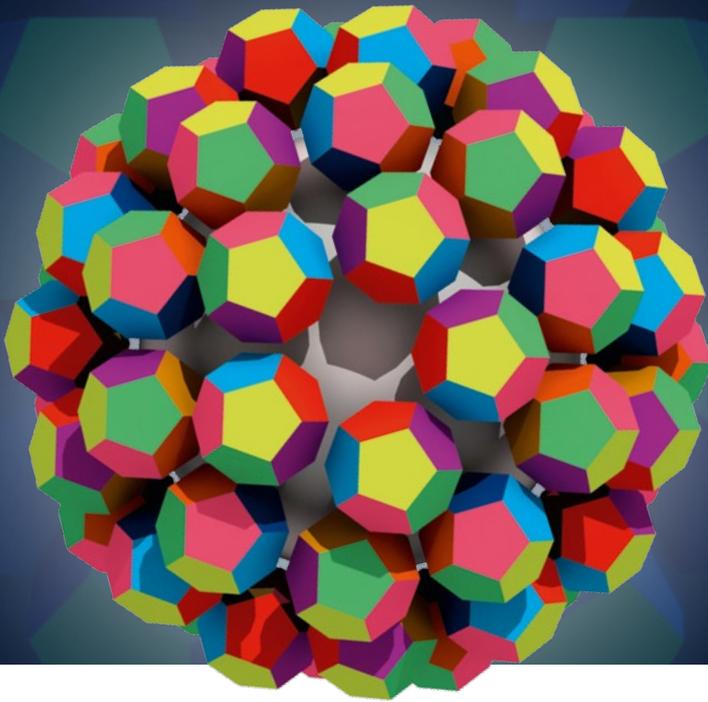
► TITELTHEMA

GRUPPENTHEORIE

48 Die Rettung des Riesentheorems

Stephen Ornes

Vier alternde Mathematiker bemühen sich, den längsten Beweis ihres Fachs von 15 000 Seiten Umfang auf ein handhabbares Maß zu komprimieren – bevor der Überblick über die Klassifikation der endlichen einfachen Gruppen mit ihnen zu Grabe getragen wird.



66



MIT FRDL. GEN. VON VERENA GLASS / XINGU VIVO

62 Altersbestimmung dank Atomtests

Kernwaffen ließen den ^{14}C -Gehalt der Atmosphäre hochschnellen – was nun Forensikern und Medizinern nutzt.

Eva Maria Wild und Walter Kutschera

ERDE & UMWELT

► 66 Fluss vor dem Umbruch

Ein Staudamm an einem Nebenfluss des Amazonas wird ein einmaliges Ökosystem einschneidend verändern.

Mark Sabaj Pérez

78



DREAMSTIME / DANIEL SCHWEINERT

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

► 74 Die Geheimtinten der CIA

Erst seit vier Jahren sind die Rezepte öffentlich.

Matthias Ducci und Marco Oetken

TECHNIK & COMPUTER

78 Intelligenz bei Mensch und Maschine

Spektakulären Erfolgen zum Trotz fehlt den Maschinen noch viel zur universellen Intelligenz des Menschen.

Jean-Paul Delahaye

87 Wissenschaft im Rückblick

Von der Kielwasserspür zur Lepraheilung mit Contergan

88 Rezensionen

Ian Stewart: Mathematische Detektivgeschichten • *Josef Reichholf*: Mein Leben für die Natur • *M. Landa, L. Duggleby*: Salz der Erde • *Andreas Müller*: Zeitreisen und Zeitmaschinen u. a.

94 Leserbrief/Impressum

96 Futur III

Rebecca Roland: Die Extraktion

98 Vorschau

Titelmotiv: Jos Leys, www.josleys.com

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

PALÄANTHROPOLOGIE

Frühe Arktisbewohner

Der Fund eines Mammutskeletts lässt die Besiedlungsgeschichte der sibirischen Arktis in neuem Licht erscheinen. Bisher waren Anthropologen davon ausgegangen, dass sich Menschen erst vor zirka 35 000 Jahren in der Region ausbreiteten. Das jetzt gefundene Mammut wurde allerdings bereits 10 000 Jahre früher erlegt, und zwar klar von Menschenhand, wie Forscher um Vladimir Pitulko von der Russischen Akademie der Wissenschaften nachgewiesen haben. Demnach ist es *Homo sapiens* schon überraschend früh gelungen, unter den Extrembedingungen im arktischen Sibirien zu überleben. Fortschritte in der Jagdtechnik könnten dies ermöglicht haben.

Die Überreste des männlichen Wollhaarmammuts (*Mammuthus primigenius*) kamen bereits 2012 zu Tage. Ein elfjähriger Junge fand sie zufällig nahe Sopochnaya Karga, einer Stadt im nördlichen Sibirien, und verständigte die Behörden. Die Forscher haben die Knochen per Radiokohlenstoffanalyse datiert und mit einem Computertomografen untersucht. Dabei entdeckten sie scharfkantige Verletzungen an Rippen, Kieferknochen und Stoßzähnen, die dem Tier vor und nach dem Tod zugefügt worden waren. Es handelt sich um typische Jagd- und Zerlegungsspuren.

Science 351, S. 260–263, 2016



PITUKOV ET AL.: EARLY HUMAN PRESENCE IN THE ARCTIC EVIDENCE FROM 46 000-YEAR-OLD MAMMOTH REMAINS. IN: SCIENCE 351, S. 260-263, 2016, FIG. 2C

Ein Forscher während der Ausgrabung des Mammutskeletts.



Mehr Aktualität!

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

KLIMAFORSCHUNG

Grönlands Eisschild schrumpft unter Nachtwolken

Das Abschmelzen des grönländischen Eisschilds trägt maßgeblich zum weltweiten Anstieg des Meeresspiegels bei. Eine wichtige Rolle dabei spielen Wolken, wie eine Studie ergeben hat. Kristof Van Tricht von der Katholischen Universität Leuven (Belgien) und seine Kollegen zeigen darin, dass eine nächtliche Wolkendecke über Grönland dort rund 35 Prozent mehr Schmelzwasser abfließen lässt, verglichen mit klarem Himmel.

Die Forscher führten Messdaten von Satelliten (CloudSat und CALIPSO) und bodengestützten Wetterstationen mit Klimamodellen zusammen, um die Energiebilanz des Eisschilds zu berechnen. Laut den Ergebnissen erhöhen Wolken die Temperatur des Eises, indem sie es wie eine Decke isolieren

und seine Wärmeabstrahlung nach oben behindern. Der Effekt ist nachts am größten. Den Autoren zufolge beträgt der Strahlungsantrieb der grönländischen Wolken übers Jahr gemittelt 30 Watt pro Quadratmeter.

Bisherige Klimamodelle konnten den Einfluss der Wolken nur ungenau abbilden. Mit der Verfügbarkeit von Satellitendaten ändert sich das nun. Dabei treten überraschende Erkenntnisse zu Tage. Beispielsweise geht aus der neuen Studie hervor, dass der Strahlungsantrieb der Wolken nicht etwa mehr Eis tauen lässt wie bisher angenommen. Stattdessen lässt er das Schmelzwasser nachts nicht wieder gefrieren. So sickert es zur Sohle des Eisschilds und von da aus ins Meer.

Nat. Comm. 7, 10266, 2016

Zählende Venusfliegenfallen

Venusfliegenfallen (*Dionaea muscipula*) sind fleischfressende Pflanzen, die Insekten fangen. Wenn sie sich daran machen, ihre tierische Beute zu verdauen, zählen sie zuerst, wie oft diese ihre Fühlborsten gestreift hat. Das geht aus Untersuchungen von Erwin Neher, Träger des Nobelpreises für Physiologie oder Medizin, und seinen Kollegen am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen hervor.

Die Forscher imitierten zappelnde Kerbtiere, die auf das Fangblatt der Pflanze gelangen, indem sie die dort befindlichen Fühlborsten bis zu 60-mal berührten. Ein solcher mechanischer Stimulus löst einen elektrischen Impuls aus, der sich über das ganze Blatt fortpflanzt und mit Elektroden registriert werden kann. Nach zwei aufeinander folgenden Kontakten klappt das Fangblatt zu und schließt das Beutetier ein. Doch erst nach dem fünften Reiz beginnt die Pflanze damit, Enzyme zu produzieren, die das gefangene Insekt zersetzen.

Die Fangblätter der Venusfliegenfalle klappen zusammen und schließen das Beutetier ein.



Die Forscher vermuten, dass Venusfliegenfallen mit diesem Mechanismus sicherstellen, dass tatsächlich lebende Beute in der Falle sitzt – und es sich lohnt, die Verdauung anzukurbeln.

Curr. Biol. 26, S. 1–10, 2016

FOTOLIA / PATILA

Zuckerstoff hilft bei Wasseraufbereitung

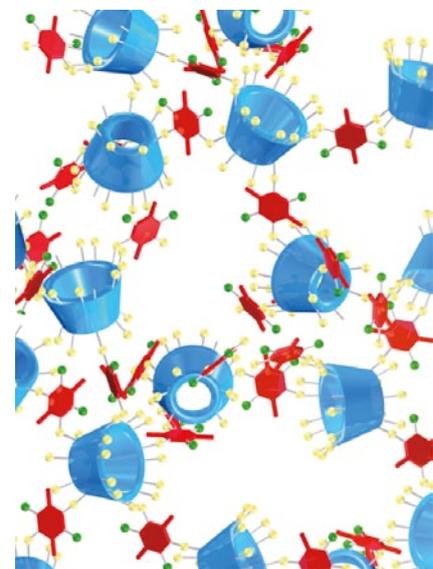
Eine neue Methode, um Wasser zu reinigen, stellen Forscher der Cornell University (USA) vor. Die Gruppe um den Chemiker William Dichtel hat ein Material entwickelt, das verschiedene organische Schadstoffe aus Wasser entfernt – mit bisher unerreichter Effizienz.

Als Ausgangsstoff verwenden die Wissenschaftler β -Cyclodextrin, eine Zuckerverbindung. Darin sind jeweils sieben Glukosemoleküle zu einer ringförmigen Struktur verknüpft, die einen zentralen Hohlraum aufweist. Dichtel und seine Kollegen vernetzen die β -Cyclodextrin-Moleküle über starre aromatische Gruppen miteinander. Dadurch entsteht ein hochporöses

Material namens P-CDP, das eine sehr große Oberfläche besitzt.

An P-CDP adsorbieren diverse organische Verbindungen, beispielsweise Pestizide und Arzneistoffe, die häufig unerwünscht in die Umwelt gelangen und Gewässer verschmutzen. Wie Experimente zeigten, entfernt das Material solche Schadstoffe wesentlich schneller aus dem Wasser als Aktivkohle, eines der meistgenutzten Adsorptionsmittel. Zudem kann P-CDP nach vergleichsweise unkomplizierter Aufbereitung mehrfach wiederverwendet werden. Die Autoren hoffen, dass sich daraus Filter zur Wasserreinigung entwickeln lassen.

Nature 529, S. 190, 2016



ALSRAIEE, A. ET AL.: RAPID REMOVAL OF ORGANIC MICROPOLLUTANTS FROM WATER BY A POROUS BETA-CYCLODEXTRIN POLYMER. IN: NATURE 529, S. 190-194, 2016. FIG. 1A

In dem Material P-CDP sind β -Cyclodextrin-Moleküle (blau) über starre aromatische Gruppen (rot) verknüpft.

BIOLOGIE

Mäuse mögen Gedränge

Von zahlreichen Artgenossen umgeben zu sein, setzt die meisten Säugetiere unter Stress. Auf Präriewühlmäuse (*Microtus ochrogaster*), scheint das nicht unbedingt zuzutreffen, wie Dimitri Blondel von der University of Florida (USA) und seine Kollegen berichten. Die Forscher untersuchten, wie bei den Tieren die Ausschüttung von Kortikosteron, einem Stresshormon, von äußeren Bedingungen abhängt. Demnach sind die Nager bei höheren Populationsdichten innerhalb des natürlich vorkommenden Spektrums entspannter als bei niedrigen. Ihr ausgeprägtes Sozialverhalten war kürzlich auch Thema einer »Science«-Studie: Gestresste Tiere werden rasch von Artgenossen beruhigt, die ihnen ausgiebig das Fell pflegen.

Kortikosteron aktiviert den Stoffwechsel und stellt so Energie für Flucht oder Kampf bereit. Blondel und sein Team hielten die Tiere mehrere Wochen lang in eingezäunten Arealen, wobei die Populationsdichte entweder 80 oder 240 Tiere pro Hektar betrug. Per Halsbandsender verfolgten die Forscher, wie sich die Nager bewegten, und bestimmten von Zeit zu Zeit den Gehalt an Kortikosteron-Abbauprodukten im Kot der Mäuse. Bei der höheren Populationsdichte schütteten die Tiere rund 20 Prozent weniger von dem Hormon aus, obwohl sie doppelt so oft aufeinandertrafen.



AUBREY M. KELLY, CORNELL UNIVERSITY

Kontaktscheu gehört nicht zu den markantesten Merkmalen der Präriewühlmäuse.

Dass die Wühler gern in Gesellschaft sind, könnte ihren Fortpflanzungserfolg und somit ihre evolutionäre Fitness erhöhen. Möglicherweise ist dann für das einzelne Tier die Gefahr geringer, von Fressfeinden erbeutet zu werden. Zudem haben es die monogamen Nager in dünn besiedelten Gebieten schwerer, einen Partner zu finden.

Gen. Comp. Endocr. 225, 13–22, 2016

ASTRONOMIE

Hinweise auf Planet Neun

Unser Sonnensystem könnte einen weiteren massereichen Planeten besitzen, der die Sonne in sehr großem Abstand umläuft. Das lassen neue astronomische Berechnungen vermuten. Nach gängiger Definition gibt es derzeit acht bekannte Planeten.

Konstantin Batygin und Michael Brown vom California Institute of

Technology (USA) weisen darauf hin, dass ferne transneptunische Objekte (TNO) einige seltsame Bahnneigungen haben. TNO sind Himmelskörper, deren Umlaufbahnen jenseits des Neptunorbits liegen. Man kennt Hunderte von ihnen, darunter Quaoar, Varuna und Sedna mit je einigen hundert Kilometer Durchmesser.

Wie Batygin und Brown schreiben, liegen sowohl die sonnennächsten Bahnpunkte als auch die Bahnebenen solcher TNO auffallend dicht beieinander. Dies lasse sich mit der Existenz eines Planeten erklären, der etwa die zehnfache Masse der Erde besitze und der Sonne nie näherkomme als 200

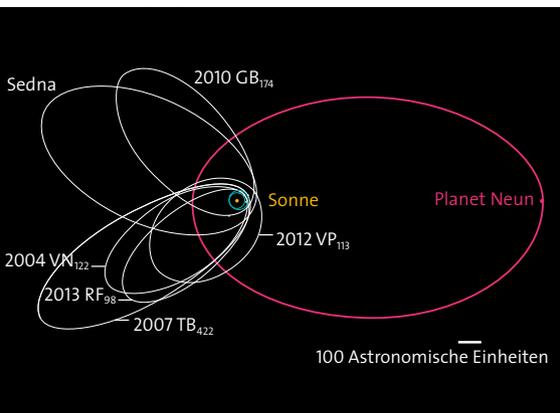
Astronomische Einheiten (AE, der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne). Ein solcher Himmelskörper zöge seine Kreise weit außerhalb der Plutobahn und würde für einen Sonnenumlauf 10 000 bis 20 000 Jahre benötigen. Er wäre vermutlich kleiner als Neptun und könnte in der Frühzeit des Sonnensystems nach außen getrieben worden sein.

Andere Astronomen begegnen der These skeptisch – eine Kontroverse, die sich nicht leicht ausräumen lässt. Denn sollte der neunte Planet existieren, wäre es sehr schwierig, ihn mit einem Teleskop zu beobachten. Möglicherweise lässt er sich aber auch anders belegen: Seine Schwerkraft müsste TNO mit steilen Bahnneigungen hervorbringen. Einige wurden bereits nachgewiesen, aber noch sind die Indizien recht spärlich.

Astron. J. 151, 22, 2016

Die Umlaufbahnen ferner transneptunischer Objekte bilden eine auffällige Schar (weiß). Verantwortlich dafür könnte ein noch unbekannter, großer Planet sein (rot).

NATURE, NACH: BATYGIN, K., BROWN, M.E.: EVIDENCE FOR A DISTANT GIANT PLANET IN THE SOLAR SYSTEM. IN: ASTRONOMICAL JOURNAL 151, 2016, FIG. 2





ERDAUFGANG ÜBER MONDKRATERN

Wissenschaftler der US-Raumfahrtbehörde NASA ließen die Kameras ihres Lunar Reconnaissance Orbiter kurzzeitig schräg über die Mondoberfläche auf unseren Planeten blicken. Für das spektakuläre Foto kombinierten die Forscher Einzelbilder aus dem Verlauf des anspruchsvollen Manövers. Die Sonde kartiert unseren Trabanten seit 2009 und umkreist ihn so schnell, dass aus ihrer Perspektive die Erde alle zwei Stunden aufgeht.

KOSMOLOGIE

Die angekündigte Supernova

Besser hätte es sich zum Geburtstag der allgemeinen Relativitätstheorie nicht treffen können: Mit Einsteins Gleichungen haben Astronomen erstmals das wiederholte Aufleuchten einer Supernova vorausberechnet!

VON JAN HATTENBACH

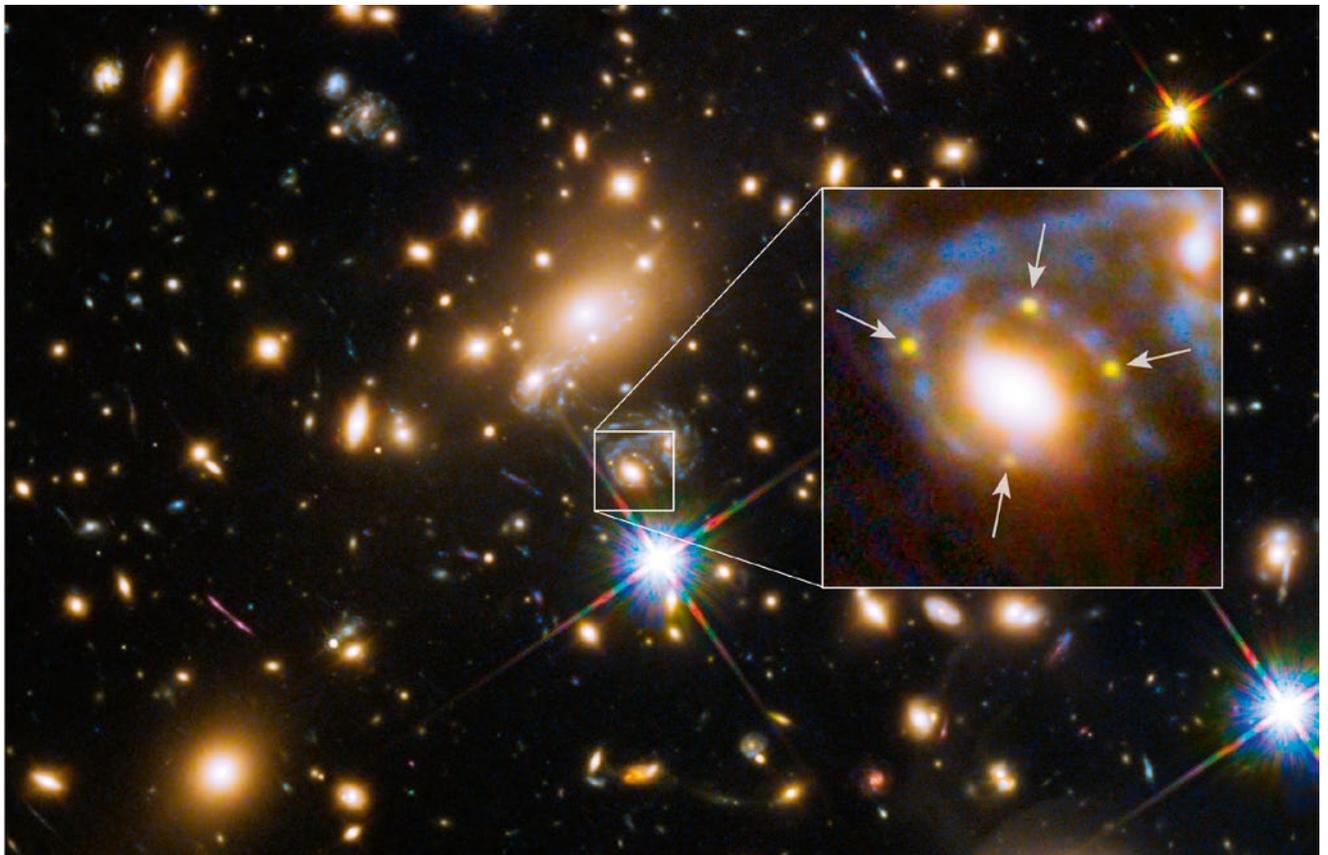
Es ist nicht das, was man sich gemeinhin unter einer Vorhersage vorstellt: Auch Supernova »Refsdal« erschien zunächst völlig ohne Vorwarnung. Patrick Kelly von der University

Die Supernova »Refsdal« ereignete sich in einer Entfernung von 9,3 Milliarden Lichtjahren von der Erde. Sowohl ihre Muttergalaxie als auch der auf der Sichtlinie zur Erde befindliche Galaxiencluster MACS J1149.6+2223 auf etwa halber Strecke wirken für das Licht der Supernova als Gravitationslinse. Dadurch ist die Supernova mehrfach zu sehen. Diese Abbildung des Hubble-Teleskops zeigt das so genannte Einstein-Kreuz.

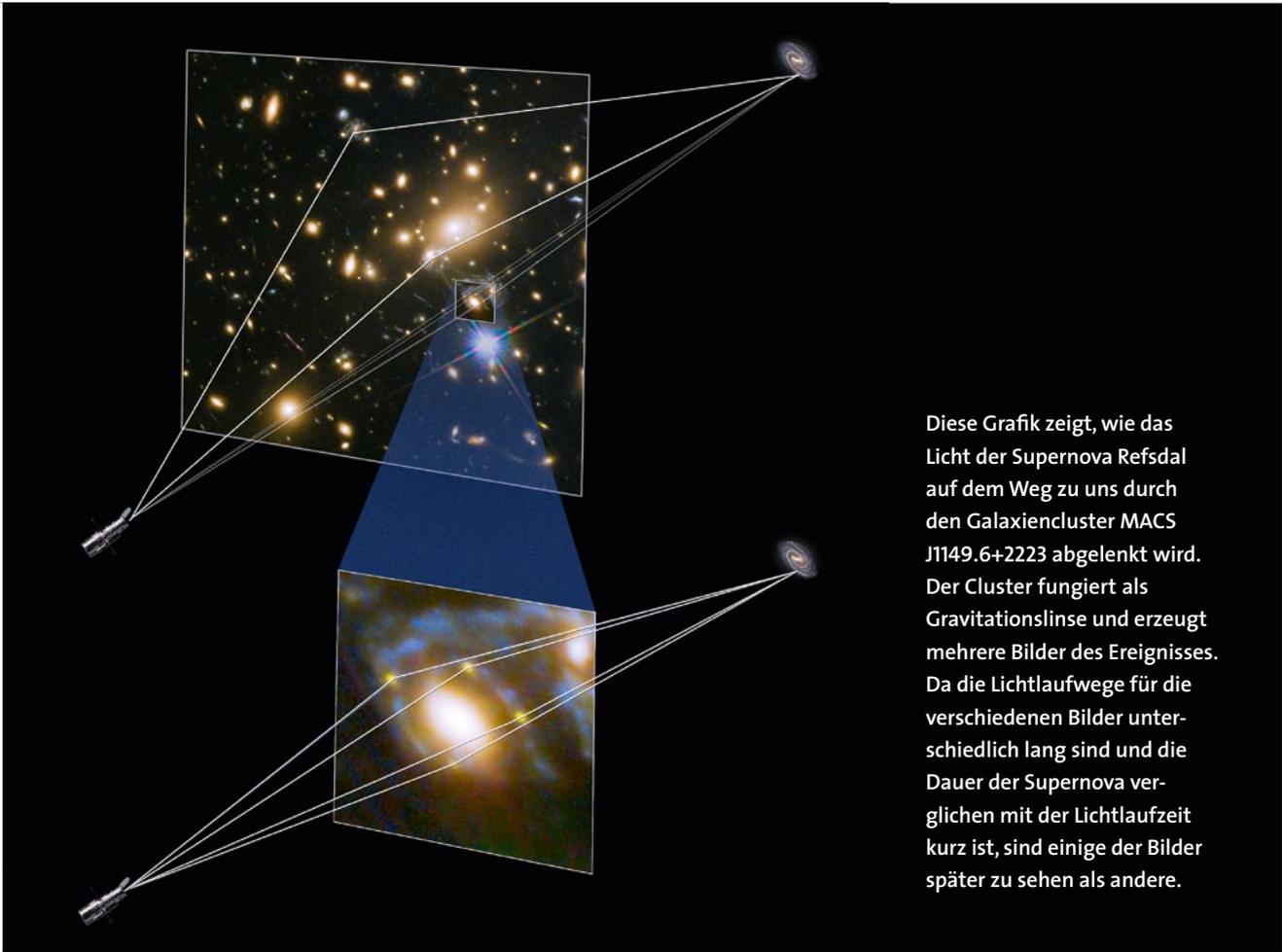
of California und seine Kollegen fanden sie Ende 2014 auf Bildern des Weltraumobservatoriums Hubble (*Science* 347, S. 1123–1126, 2015). Doch gut ein Jahr später war die Sternexplosion wieder zu sehen, an einer anderen Stelle der fotografierten Himmelsregion – dieses Mal aber vorausberechnet und erwartet von Kelly und seinem Team. Dabei spielten die relativistischen Feldgleichungen der Gravitation, die Albert Einstein vor 100 Jahren veröffentlicht hatte, eine entscheidende Rolle.

Eine zeitlich versetzt mehrfach und noch dazu an verschiedenen Himmelspositionen aufleuchtende Supernova klingt nach einem Ding der Unmöglichkeit. Supernova-Explosionen sind ein-

malige und endgültige Ereignisse: Sie markieren das Zerbersten eines massereichen Sterns. Für einige Wochen leuchten sie heller als alle Sterne einer Galaxie zusammen, noch Monate und Jahre später ist ihr Nachglimmen mit modernen Teleskopen zu erkennen. Vom Stern selbst bleibt höchstens ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch übrig. Das gilt auch für Refsdal: »Die Daten zeigen, dass es sich wahrscheinlich um eine Supernova vom Typ II gehandelt hat, also die Explosion eines sehr massereichen Sterns mit einer Wasserstoffhülle«, erklärte Kelly kurz nach der Entdeckung. »Ihre Lichtkurve ist mit jener der Supernova 1987A vergleichbar, die in der Großen Magellanschen Wolke



NASA / ESA / STEVE RODNEY (JHU) UND DAS FRONTIER-SN TEAM / TOMMASU TREU (UCIA), PATRICK KELLY (UC BERKELEY) UND DAS CLASS TEAM / JENNIFER LOTZ (STSCI) UND DAS FRONTIER FIELDS TEAM / MARC POSTMAN (STSCI) UND DAS CLASH TEAM / ZOLTAN LEVAY (STSCI)



Diese Grafik zeigt, wie das Licht der Supernova Refsdal auf dem Weg zu uns durch den Galaxiencluster MACS J1149.6+2223 abgelenkt wird. Der Cluster fungiert als Gravitationslinse und erzeugt mehrere Bilder des Ereignisses. Da die Lichtlaufwege für die verschiedenen Bilder unterschiedlich lang sind und die Dauer der Supernova verglichen mit der Lichtlaufzeit kurz ist, sind einige der Bilder später zu sehen als andere.

NASA/ESA

aufleuchtete.« Diese im Jahr 1987 mit bloßem Auge sichtbare Detonation in der gerade einmal 160 000 Lichtjahre entfernten Nachbargalaxie der Milchstraße gilt als nächstgelegene beobachtete Supernova seit Jahrhunderten.

Refsdal hingegen befand sich am Rand des beobachtbaren Universums – im Spiralarm einer namenlosen, rund neun Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie im Sternbild Löwe. Eigentlich zu weit weg, selbst für das Weltraumteleskop Hubble. Die nötige Nachhilfe kam von einem fünf Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxienhaufen namens MACS J1149.6+2223, der sich in der Sichtlinie von Galaxie und Supernova befindet. Seine Masse wirkte als Gravitationslinse: Sie verstärkte die Helligkeit des Supernova-Abbilds um das 15-Fache und vervielfältigte es außerdem.

Die Masse eines besonders großen Mitglieds des MACS-Haufens, das genau vor dem Spiralarm mit der Supernova liegt, lenkte das Licht der Sternexplosion auf verschiedene Pfade und bildete

es vierfach ab. Auf den Fotografien um die Zentralregion der Ursprungsgalaxie zeigte sich ein symmetrisches, geradezu lehrbuchmäßiges Einstein-Kreuz. Dieser Effekt ist schon lange bekannt. Er folgt aus der durch die Gravitation hervorgerufenen Krümmung der Raumzeit, wie sie die allgemeine Relativitätstheorie beschreibt. Dieser Krümmung muss auch das Licht folgen.

Lichtlaufzeit ist entscheidend

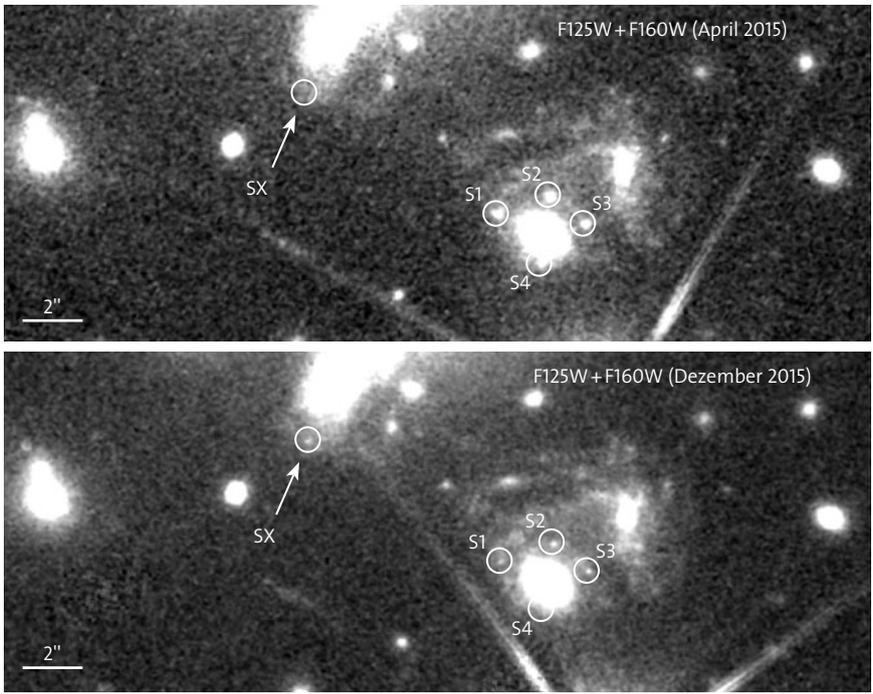
Form und Position eines von einer Gravitationslinse projizierten Bildes hängen dabei vom Weg ab, den das Licht von seiner Quelle zum Beobachter zurücklegen muss. Je länger die Strecke, desto länger dauert es zudem, bis das Bild sichtbar wird.

Vor Supernova Refsdal hatten Astronomen nur statische Gravitationslinsenbilder gesichtet. Sie stammten von Galaxien, deren Licht sich vor vielen Millionen Jahren auf den Weg gemacht hatte und die über einen entsprechend langen Zeitraum existieren, so dass

ihre Bilder für uns dauerhaft sichtbar sind. Bei einem kurzlebigen Ereignis wie einer Supernova spielen die unterschiedlichen Lichtlaufzeiten allerdings eine entscheidende Rolle.

Über 40 Stunden Beobachtungszeit bekam Kellys Team mit dem Hubble-Weltraumteleskop zugesprochen, um das seltene Phänomen zu untersuchen. Auch erdgebundene Teleskope beteiligten sich daran. Dabei kam den Entdeckern zunächst eine Idee des 2009 verstorbenen norwegischen Astrophysikers Sjur Refsdal in den Sinn. Dieser hatte vor 50 Jahren vorgeschlagen, eine mehrfach gelinnte Supernova zur genaueren Bestimmung der in der Kosmologie so wichtigen Hubble-Konstanten zu verwenden. Die Hubble-Konstante legt beispielsweise das Alter und die Expansionsgeschwindigkeit des Universums fest. Allerdings haben Kosmologen in der Zwischenzeit präzisere Methoden dafür entwickelt. So erhielt die Supernova immerhin Refsdals Namen, auch wenn sie den Kosmologen

KELLY, P. L. ET AL.: DEFAVOR ALL OVER AGAIN: THE REAPPEARANCE OF SUPERNOVA REFSDAL. IN: ARXIV:1512.04654, 2015. FIG. 1A UND B; MIT FRDL. GEF. VON PATRICK KELLY



Die Abbilder S1 bis S4 der Refsdal-Supernova als Einstein-Kreuz waren über mehrere Monate deutlich zu erkennen. Die obere Aufnahme stammt vom April 2015. Im Foto vom Dezember 2015 sind die vier Abbildungen S1 bis S4 bereits abgeschwächt. Dafür ist ein neues Abbild SX der Sternexplosion aufgetaucht. Die Forscher hatten sein Erscheinen auf Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie und der bekannten Materieverteilung des Galaxienclusters MACS J1149.6+2223 vorausberechnet.

diesbezüglich nicht sehr nützlich war. Dafür bot sie die Gelegenheit, die allgemeine Relativitätstheorie auf Herz und Nieren zu testen.

Die vier Abbildungen vom November 2014 lagen einander recht nahe. Die zugehörigen Wege, die das Licht zurücklegen musste, waren fast gleich lang. Somit erschienen die Bilder nahezu gleichzeitig. Doch die Wirkung der Gravitationslinse ist so stark, dass nicht nur das Bild der Supernova, sondern auch ihre Heimatgalaxie selbst mehrfach abgebildet wird. So fanden die Forscher auf den Hubble-Bildern zwei weitere »Versionen« der Galaxie. Auch hier müsste die Supernova auftauchen, wengleich zu anderen Zeitpunkten: Denn ist der Lichtweg erheblich länger (oder kürzer), erscheint das zugehörige Abbild der Supernova möglicherweise Monate oder Jahre später (oder früher).

Sollte es gelingen, diese Zeitpunkte richtig vorherzusagen, wäre die Theorie, nach der Massen die Raumzeit krümmen und damit auch das Licht ablenken, einmal mehr bestätigt. Mit den gesammelten Beobachtungsdaten sowie Modellen der Massenverteilung in MACS J1149.6+2223 und natürlich Albert Einsteins Formeln machten sich die Forscher an die Arbeit. Recht bald war klar, dass sie das erste Aufflammen der

Supernova verpasst hatten: Refsdal wäre ihren Berechnungen zufolge schon um das Jahr 1995 in einem der beiden Galaxienabbilder sichtbar gewesen, ohne jedoch beobachtet worden zu sein.

Bestätigung schneller als gedacht

Glücklicherweise sah die Sache für das zweite Abbild anders aus. Wie ein Team um Tommaso Treu von der University of California in Los Angeles im Herbst 2015 berichtete, sollte sich die Supernova hier in den folgenden Monaten wieder zeigen – etwas schwächer zwar, aber für das Hubble-Teleskop dennoch gut sichtbar. Da die Massenverteilung im Galaxienhaufen allerdings nur mit gewissen Ungenauigkeiten bekannt ist, konnten Treu und sein Team kein spezifisches Datum für das Erscheinen angeben. Das Hubble-Teleskop sowie andere, auch bodengebundene Observatorien blickten daher seit Oktober 2015 regelmäßig in Richtung des MACS-Galaxienhaufens – man wollte das Wiedererscheinen schließlich nicht verpassen. Die höchste Wahrscheinlichkeit für dieses Ereignis, das zeigten alle durchgerechneten Modelle, bestand für das erste Drittel des Jahres 2016.

Doch so lange sollte es gar nicht dauern: Die Arbeit von Treu und seinen Kollegen war noch nicht gedruckt, da ver-

kündete Kelly am 12. Dezember 2015 über den Nachrichtendienst »Astronomer's Telegram« die Sichtung eines sehr verdächtigen Objekts: »Die »neue« Supernova stimmt sowohl von ihrer Position als auch vom Zeitpunkt ihres Auftauchens her mit den Vorhersagen überein«, berichtete der Forscher. »Auch ihre Helligkeit entspricht ungefähr den Erwartungen. Daraus schließen wir, dass es sich [sehr] wahrscheinlich um die wiedererschienene Supernova Refsdal handelt.«

Ein beeindruckender Erfolg, der zeigt, wie genau die Astronomen inzwischen die Materieverteilung in fernen Galaxienhaufen verstehen. Vor allem aber ist er ein weiterer Beleg für die Richtigkeit der allgemeinen Relativitätstheorie, die bislang noch alle Feuerproben bestanden hat. Und auch wenn sich Sjur Refsdals Idee letztlich nicht in die Tat umsetzen ließ, wurde sie nachträglich gewürdigt.

Dank Gravitationslinse war die Supernova auch noch am 30. Dezember 2015 auf den Teleskopbildern zu sehen: Sjur Refsdal wäre an diesem Tag 80 Jahre alt geworden.

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

Auf dem Weg zum personalisierten Ernährungsplan

Viele Menschen richten ihre Ernährung nach pauschalen Diätplänen aus. Der Konsum einzelner Nahrungsmittel kann sich individuell jedoch ganz unterschiedlich auswirken. Das zeigt jetzt eine Untersuchung des Blutzuckerspiegels von 800 Probanden.

VON EVA DIEHL

Nie hätte sie gedacht, dass ausgerechnet Tomaten ihren Blutzuckerspiegel derart hochtreiben würden. Schon seit Jahren hatte die Probandin mittleren Alters vielerlei Diäten ausprobiert, um ihre chronisch hohen Werte zu senken – jedoch mit mäßigem Erfolg. Erst nachdem sie sich für eine Studie des israelischen Weizmann Institute of Science in Rehovot angemeldet hatte, erfuhr sie, wie unvorhersehbar einige Nahrungsmittel auf sie wirken.

Solch extreme Reaktionen zeigten nicht alle der insgesamt 800 Studienteilnehmer. Jedoch beobachteten die israelischen Forscher, dass Nahrungsmittel den Blutzuckerspiegel generell von Mensch zu Mensch ganz unterschiedlich beeinflussen (*Cell* 163, S. 1079–1094, 2015). Die Studienleiter Eran Elinav vom Department of Immunology und Eran Segal vom Department of Computer Science and Applied Mathematics plädieren daher dafür, derart individuelle Unterschiede in Diätplänen zu berücksichtigen.

An der Studie des Weizmann Institute nahmen Frauen und Männer zwischen 18 und 70 Jahren teil, die nicht an Diabetes erkrankt waren. Eine Woche lang trugen sie stets ein Gerät bei sich, das alle fünf Minuten die Konzentration an Glukose im Blut kontrollierte. Die Probanden gingen ihren üblichen Lebensgewohnheiten nach und protokollierten mit ihren Smartphones sämtliche Aktivitäten sowie insgesamt 47 000 Mahlzeiten.

Zum Frühstück verordneten ihnen die Forscher eine standardisierte, kohlenhydratreiche Diät. Trotzdem stiegen die individuellen Glukosewerte im Blut der Probanden während der ersten zwei

Stunden danach in sehr unterschiedlichem Maß an.

Was geschieht nach dem Verzehr von kohlenhydratreichen Speisen wie Brot, Kartoffeln oder Kuchen? Über den Darm gelangen größere Mengen an Glukose in die Blutbahn. Dieser einfache Zucker dient dem Organismus als wichtiger Energielieferant und kann – angeregt durch Insulin – als Glykogen in Zellen gespeichert werden.

Ein erhöhter Blutzuckerspiegel stellt eine mögliche Vorstufe von Diabetes mellitus Typ 2 dar und geht oft mit anderen Stoffwechselstörungen wie Fettleibigkeit, Bluthochdruck oder Herzproblemen einher. Viele Betroffene vermeiden oder beschränken auf Anraten ihrer Ärzte die Zufuhr bestimmter Nahrungsmittel, die auf Grund ihres Kohlenhydratgehalts oder ihrer üblichen Wirkung auf den Blutzuckerspiegel als schädlich gelten. »Anhand unserer

Daten sehen wir, dass solche allgemeinen Diätempfehlungen den Menschen nicht immer helfen«, sagt Segal.

Frühere Studien legten bereits nahe, dass die gleichen Diätpläne unterschiedlich auf einzelne Personen wirken. Wie sehr ein Mensch durch eine Ernährung mit geringem Kohlenhydratanteil abnimmt, kann beispielweise damit zusammenhängen, wie viel Insulin sein Körper nach der Mahlzeit ausschüttet. Auch die zur Senkung des Cholesterinspiegels im Blut häufig empfohlene Mittelmeerdiät mit viel Fisch, Olivenöl und Gemüse zeigt nicht bei jedem die erwünschte Wirkung. Es ist umstritten, wie stark die Ernährung den Cholesterinspiegel beeinflusst, und einige pauschale Diätempfehlungen wie die eines reduzierten Eierkonsums gelten mittlerweile als überholt.

Viele individuelle Merkmale tragen dazu bei, dass der Blutzuckerspiegel un-



Welche Lebensmittel für einen Menschen gesund oder schädlich sind, ist individuell höchst unterschiedlich und hängt unter anderem von der Darmflora ab.

terschiedlich reagiert. Das bestätigten die Forscher des Weizmann Institute anhand von Fragebögen zum Gesundheitszustand der Probanden, von Körpermaßen sowie Bluttests und DNA-Analysen von Stuhlproben.

So stieg der Zuckerlevel nach dem Essen bei älteren Menschen stärker als bei jüngeren. Ähnliches gilt für Personen mit erhöhtem Blutdruck, Body-Mass-Index oder Cholesterinspiegel – diese Stoffwechseldefizite treten oft gemeinsam auf und werden als metabolisches Syndrom bezeichnet. Zudem spielt offenbar eine wichtige Rolle, wie sich die Darmflora zusammensetzt: Die Forscher fanden bestimmte Mikroben, die entweder für einen hohen oder einen niedrigen Blutzuckerspiegel nach dem Essen typisch waren und entsprechend jeweils in großer Anzahl im Darm vorkamen. Einige der für hohen Blutzucker charakteristischen Bakterien stehen bereits im Verdacht, mit Fettleibigkeit und Insulinresistenz zusammenzuhängen (siehe Spektrum-Spezial Biologie Medizin Hirnforschung 2/2016, S. 24).

Ein persönlich zugeschnittener Diätplan, der den Blutzuckerspiegel effektiv senkt, müsste alle solche Facetten berücksichtigen. Um diese komplexe Aufgabe zu lösen, setzte das Forscherteam um Segal ein lernfähiges Computersys-

tem ein. Es identifizierte zunächst Muster in 140 individuellen Eigenschaften der 800 Probanden in Zusammenhang mit ihrem Blutzuckerspiegel nach dem Essen und leitete daraus Gesetzmäßigkeiten ab.

Diese erlaubten dem Computer daraufhin, den Zuckerlevel anderer Probanden nach einer beliebigen Mahlzeit vorherzusagen. In einem einwöchigen Experiment der israelischen Forscher mit 100 neuen Versuchspersonen stimmten die so berechneten Werte mit den gemessenen Daten tatsächlich weitgehend überein. Allein auf Grundlage des Kohlenhydratgehalts, wie es bisher üblich war, lässt sich der Zuckerspiegel dagegen deutlich schlechter vorhersagen.

Computer als Ernährungsberater

In einem dritten Experiment testeten die Forscher vom Weizmann Institute, ob ihr Computersystem auch herausfinden kann, welche Lebensmittel für einzelne Personen gesund beziehungsweise ungesund sind. Dazu stellten sie nach den Vorgaben des Algorithmus für zwölf neue Probanden individuell optimierte Diätpläne zusammen. Diese enthielten Lebensmittel, für die der Computer einen niedrigen Blutzuckerspiegel nach dem Essen berechnet

hatte. Verglichen mit bewusst ungesund zusammengestellten Essensplänen senkte die optimierte Diät den Blutzuckerspiegel bei zehn der zwölf Probanden effektiv und reduzierte auch die Spitzenwerte nach dem Essen. Damit war sie mindestens genauso wirksam wie ein alternatives Gesundheitsregime eines anerkannten Ernährungsspezialisten. Zudem wirkte sie sich positiv auf die Darmflora aus: Solche Mikroben, die für einen hohen Blutzuckerspiegel nach dem Essen typisch sind, nahmen ab.

Auch Kardiologen verwenden bereits Computermodelle, um individuelle Therapiepläne zu erstellen. Dazu berechnen sie auf Basis der Daten von rund 200 000 Studienteilnehmern aus insgesamt zwölf europäischen Ländern das Risiko einer Person, in den nächsten zehn Jahren einen Herzinfarkt zu erleiden. In die Kalkulation fließen Geschlecht, Alter, Raucherstatus, Blutdruck und Cholesterinspiegel ein. Je nach Resultat verordnen die Ärzte dann, bestimmte Cholesterinwerte einzuhalten, nicht zu rauchen, sich gesund zu ernähren sowie sportlich zu betätigen, und identifizieren Kandidaten für eine medikamentöse Therapie.

Eva Diehl ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Gießen.

ZAHLENTHEORIE

Ist die ABC-Vermutung bewiesen?

Auch eine hochkarätig besetzte Konferenz konnte diese Frage nicht klären. Der seit drei Jahren vorliegende Beweis ist so schwierig, dass nach wie vor nur der Autor selbst ihn versteht.

VON KEVIN HARTNETT

Anfang Dezember letzten Jahres blickte die mathematische Welt nach Oxford, voll der Hoffnung, dass sich auf einer Tagung der Nebel um ein drei Jahre altes Geheimnis wenigstens ein bisschen lichten würde.

Es ging um die Arbeit von Shinichi Mochizuki, einem genialen Mathematiker an der Universität Kyoto in Japan.

Der hatte im August 2012 vier lange Arbeiten online gestellt, welche die Fachwelt nicht ignorieren konnte. Denn mit seiner »inter-universal Teichmüller theory (IUT)« behauptete er, nichts weniger als die ABC-Vermutung bewiesen zu haben, eines der berühmtesten ungelösten Probleme der Zahlentheorie (Spektrum der Wissenschaft 2/2009, S. 70).

Schon wenige Tage nach der Veröffentlichung war klar, dass Mochizukis Werk die Gemeinschaft der Mathematiker vor eine praktisch beispiellose Herausforderung stellte. Man musste es ernst nehmen: Mochizuki hatte bereits etliche sehr schwere Probleme gelöst und dabei große Sorgfalt in Details unter Beweis gestellt. Aber seine IUT-

Theorie, die er 20 Jahre lang im Alleingang ausgearbeitet hatte, war nahezu unlesbar. Vor den mehr als 500 Seiten, die in einem eigens erfundenen Formalismus geschrieben sind und zahlreiche neue Begriffe und Definitionen enthalten, strichen die meisten Mathematiker nach vergeblichem Bemühen die Segel. Zu allem Überfluss lehnte Mochizuki jede Einladung ab, außerhalb Japans über seine Arbeiten vorzutragen.

Drei Jahre lang dümpelte die Sache vor sich hin; dann wollten die Fachleute es wissen. Die prominentesten Mathematiker der Welt versammelten sich ab dem 7. Dezember in Oxford, auf Einladung des Clay Mathematics Institute, jenes Instituts, das auf die Lösung von sieben »Jahrtausendproblemen« – darunter den Beweis der ABC-Vermutung – je eine Million Dollar ausgesetzt hat. Das Treffen sei lange überfällig gewesen, erklärt Minhyong Kim, einer der Organisatoren. »Die Leute werden ungeduldig. Wir sind es unserem Freund

Mochizuki schuldig, endlich Klarheit zu schaffen, und uns selbst auch.«

Angesagt waren drei Tage vorbereitende Vorträge und zwei Tage zur IUT-Theorie selbst, mit dem krönenden Abschlussvortrag zum vierten Artikel, der den Beweis der ABC-Vermutung enthalten sollte. Die Erwartungen waren von Anfang an gedämpft. Ein vollständiges Verständnis oder eine klare Aussage zur Korrektheit des Beweises schienen außer Reichweite. Man wäre schon mit einem diffusen Gefühl von der Macht der Theorie glücklich gewesen.

Einfache Gleichung, schwere Vermutung

Die ABC-Vermutung handelt von drei beliebigen teilerfremden natürlichen Zahlen A, B, C , welche die vielleicht einfachste denkbare Gleichung erfüllen: $A + B = C$. Multipliziert man alle in A, B und C vorkommenden Primfaktoren miteinander, verwendet aber jeden Faktor nur einmal und nimmt dieses Pro-

dukt dann hoch $1 + \varepsilon$ mit einem beliebig kleinen $\varepsilon > 0$, dann – so die Behauptung – ist das Ergebnis größer als C , mit höchstens endlich vielen Ausnahmen (siehe »Primzahlen und zusammengesetzte Zahlen«, S. 17).

Damit etabliert die ABC-Vermutung eine unerwartete Verbindung zwischen der additiven und der multiplikativen Struktur der natürlichen Zahlen. Denn eigentlich ist nicht einzusehen, warum die Primfaktoren zweier beliebiger Zahlen A und B mit denen ihrer Summe C etwas zu tun haben sollten.

Seit der Franzose Joseph Oesterlé und der Brite David Masser 1985 die Vermutung aufstellten, gab es wenig Fortschritte auf dem Weg zu ihrem Beweis. Immerhin erkannten die Mathematiker bald, dass sie wie eine Spinne im Netz anderer großer Probleme der Mathematik sitzt. Dazu gehört zum Beispiel die mordellsche Vermutung, nach der eine gewisse algebraische Gleichung höchstens endlich viele rationa-

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
VERLAG

DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT

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

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

Ort: Heidelberg

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

Weitere Informationen und Anmelde-möglichkeit:

Telefon: 06221 9126-743

spektrum.de/schreibwerkstatt

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

Hier QR-Code per Smartphone scannen!



Wettrüsten der Geschlechtsorgane

Die Vielfalt der Penisformen lässt sich als Reaktion auf weibliche Abwehrstrategien verstehen.

Die abendländische Forschung entstand in patriarchalischen Gesellschaften, und in vielen Bereichen dominiert der männliche Blick noch heute. Obwohl Sigmund Freud vorwiegend weibliche Klienten psychoanalytierte, blieb die Frau für ihn nach eigener Aussage ein »dunkler Kontinent«. Die generelle Neugier des Wissenschaftlers – seinerzeit gab es kaum Forscherinnen – führt der Pionier der Seelenkunde auf das Erlebnis der »Urszene« zurück: Der Knabe belauscht die Eltern beim für ihn unbegreiflichen Geschlechtsakt und versucht sich einen Reim darauf zu machen.

Ob man diese Erklärung plausibel findet oder nicht, in jedem Fall ist die Biologie der Sexualität ein besonders spannendes Forschungsgebiet. Das beginnt schon mit der Frage, warum es überhaupt Geschlechter gibt. Anscheinend bietet die Vermischung zweier Erbstränge bei der Befruchtung einen gewissen Überlebensvorteil, aber die Lasten der sexuellen Vermehrung sind im Tierreich höchst ungleich verteilt: Während das Männchen seinen Samen durch häufigen Geschlechtsverkehr möglichst breit zu streuen sucht, muss das geschwängerte Weibchen den Nachwuchs aufwändig austragen, gebären und bei vielen Spezies weiter umsorgen.

Auf Seiten der Erzeuger entstand im Lauf der Evolution eine bunte, ausgiebig erforschte Vielfalt von Penisformen: gerade, gebogen, spiralförmig, mit Widerhaken, mit Knochen verstärkt und so weiter. Aber erst jetzt fragen sich – bezeichnenderweise fast ausnahmslos weibliche – Biologen nach dem Grund für diesen evolutionären Aufwand. Er liegt nicht so offen zu Tage wie das männliche Glied selbst, sondern verbirgt sich im Innern des weiblichen Körpers.

Zwischen den Geschlechtern findet auf Grund der unterschiedlichen Fortpflanzungskosten quasi ein Wettrüsten statt. Die weibliche Scheide bildet Falten oder komplizierte Umwege, damit der Penis nicht so leicht eindringen kann, worauf dieser komplementäre Formen entwickelt, um die vaginalen Hindernisse zu überwinden (*Science* 351, S. 214–215, 2015). Zum Beispiel entspricht dem spiralförmigen Penis des Entenichs, wie die Evolutionsbiologin Patricia Brennan vom Mount Holyoke College in South Hadley (Massachusetts) herausfand, eine ebenso geschraubte Vagina bei der Geschlechtspartnerin. Offenbar entwickelten die wählerischen Weibchen die Windungen, um nicht immerfort von dahergelaufenen Erpeln besprungen zu werden, und die wiederum legten sich in einem koevolutionären Rüstungswettlauf immer längere und am Ende korkenzieherförmige Penisse zu.

Auf der jüngsten Jahrestagung der Society for Integrative and Comparative Biology in Portland (Oregon) berichtete die Meeresbiologin Sarah Mesnick Ähnliches über Wale und Delfine. Sie hatte die Vagina von gestrandeten Exemplaren untersucht und darin blätterige Falten, aber auch labyrinthische Strukturen entdeckt, die mutmaßlich allzu häufige Begattungen verhindern sollen. Allerdings ist über das Kopulationsverhalten der großen Meeressäuger noch immer kaum etwas bekannt.

Ebenso scheint bei Schlangen und Fledermäusen ein koevolutionärer Geschlechterkampf stattzufinden. Bei diesen und vielen weiteren Tieren wird das männliche Glied durch einen Knochen versteift – so auch bei allen Primaten, interessanterweise nur nicht beim Menschen. Vermutlich soll das verhindern, dass das Weibchen den Penis durch Kontraktion der Scheide gleich wieder ausstößt.

Und die Moral von der Geschichte? Einvernehmlicher Sex ist unter Tieren die Ausnahme; Liebe zwischen Menschen ist eine kostbare kulturelle Errungenschaft, die durch Regeln und Rituale geschützt werden muss!



Michael Springer

le Lösungen haben kann. Gerd Faltings, heute am Max-Planck-Institut für Mathematik in Bonn, hatte sie 1983 bewiesen und dafür 1986 die Fields-Medaille erhalten (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 80). Wenig später bewies Noam Elkies von der Harvard University, dass man mit einem Beweis der ABC-Vermutung nicht nur die Aussage über die Existenz der Lösungen hätte, sondern auch ein Verfahren, sie zu finden.

In den 1980er Jahren konnte Lucien Szpiro von der City University New York der ABC-Vermutung eine neue Gestalt geben. Nun war sie eine Aussage über elliptische Kurven; das sind geometrische Darstellungen der Lösungen eines gewissen Typs algebraischer Gleichungen.

Der Übergang von ganzen Zahlen zu elliptischen Kurven ist eine häufig angewandte Technik. Durch ihn wird eine Vermutung zwar abstrakter und schwieriger zu formulieren, aber zugleich einer Fülle von theoretischen Werkzeugen zugänglich. Auf diesem Weg kam Andrew Wiles zu seinem berühmten Beweis des großen fermatschen Satzes. Er setzte die Aussage über natürliche Zahlen (»Die Gleichung $a^n + b^n = c^n$ hat keine nichttrivialen Lösungen in den natürlichen Zahlen für $n \geq 3$ «) zunächst in eine Behauptung über elliptische Kurven um und dann in eine über ein weiteres mathematisches Objekt, die »Galois-Darstellungen« elliptischer Kurven. Im Land der Galois-Darstellungen fand Wiles schließlich einen Beweis, den er auf die ursprüngliche Behauptung zurückübertragen konnte.

Reichhaltigere Symmetriestruktur

Einen ähnlichen Weg beschritt Mochizuki für seinen Beweisversuch. Er ging zunächst von Zahlen zu elliptischen Funktionen über, das heißt, er attackierte nicht die ABC-Vermutung direkt, sondern die Szpiro-Vermutung. Diese wiederum verwandelte er in eine Aussage über mathematische Objekte, die er eigens zu diesem Zweck erfunden hatte, die »Frobenioide«. Die entstanden ihrerseits aus der »Hodge-Arakelov-Theorie elliptischer Kurven«, einem lange verfolgten, aber letztlich geschei-

Primzahlen und zusammengesetzte Zahlen

Jede natürliche Zahl lässt sich als Produkt von Primzahlen schreiben, und diese Zerlegung ist bis auf die Reihenfolge der Faktoren eindeutig. An diesem Satz hängt die ganze Zahlentheorie.

Zwei natürliche Zahlen heißen teilerfremd, wenn sie keinen Primfaktor gemeinsam haben. Addiert man zwei teilerfremde Zahlen, so gibt es keinen offensichtlichen Zusammenhang zwischen deren Primfaktorzerlegung und derjenigen der Summe: $62 = 2 \cdot 31$, $63 = 3^2 \cdot 7$, $62 + 63 = 125 = 5^3$.

Für die ABC-Vermutung wären in diesem Beispiel alle in $A=62$, $B=63$ und $C=125$ vorkommenden Primfaktoren miteinander zu multiplizieren: $2 \cdot 31 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 5 = 6510$, was offensichtlich weit größer ist als C . Dagegen ist der Fall $A=3$, $B=125$ und $C=128=2^7$ ein Kandidat für eine Ausnahme, denn diesmal ist das Produkt der Primfaktoren nur $2 \cdot 3 \cdot 5 = 30$. Um die ABC-Vermutung zu erfüllen, müsste also $30^{1+\varepsilon}$ größer sein als 128 . Das ist falsch, sobald ε kleiner als ungefähr $0,42656$ wird.

terten Projekt Mochizukis zum Beweis der ABC-Vermutung.

Ein Frobenioid ist eine algebraische Struktur, die aus einem geometrischen Objekt gewonnen wird. Ein Beispiel für diesen Prozess liefert ein Quadrat, dessen Ecken wie üblich im Gegenuhrzeigersinn mit A , B , C und D bezeichnet werden. Dieses Quadrat kann man auf mannigfache Weise drehen und spiegeln, so dass es wieder genauso aussieht wie zuvor; nur die Ecken tragen jetzt andere Namen. Beispielsweise wird unter einer Drehung um 90 Grad im Gegenuhrzeigersinn die Eckenfolge $ABCD$ zu $DABC$. Insgesamt gibt es acht solche gestalterhaltenden Abbildungen. Sie heißen Symmetrien und bilden eine Gruppe im mathematischen Sinn (siehe dazu auch den Artikel ab S. 48).

Eigentlich wird jede Symmetrie des Quadrats vollständig durch eine Permutation (Änderung der Reihenfolge) der Buchstaben A , B , C und D beschrieben. Aber es gibt Permutationen, denen keine Symmetrie entspricht, zum Beispiel (A, C, B, D) , denn dann wäre Ecke A nicht mehr B benachbart, was bei keiner Drehung oder Spiegelung passieren kann. Die Gruppe der Permutationen ist zwar aus der Symmetriegruppe des Quadrats hervorgegangen, aber mit 24 Elementen viel reichhaltiger. Für Ausgangsobjekte, die komplizierter sind als ein Quadrat, liefert die entsprechend erweiterte Gruppe Einsichten, die mit der ursprünglichen Geometrie allein unzugänglich wären.

Frobenioide sind Erweiterungen dieser Art; allerdings setzen sie nicht auf Quadraten oder dergleichen auf, sondern auf speziellen elliptischen Kurven,

und wieder haben sie eine reichhaltigere Struktur. Mochizuki übertrug nun die Aussagen von Szpiros Vermutung, die von elliptischen Kurven handelt, auf Frobenioide. Und ebenso wie Andrew Wiles vom großen fermatschen Satz zu elliptischen Kurven und von dort zu Galois-Darstellungen übergang, wandelte Mochizuki die ABC-Vermutung über den Zwischenschritt der Szpiro-Vermutung in eine Aussage über Frobenioide um.

Hoffnung und Scheitern

Wie das im Einzelnen vorstattengehen sollte, erläuterte Kiran Kedlaya, Zahlentheoretiker an der University of California in San Diego, den Tagungsteilnehmern am Ende des dritten und am Anfang des vierten Tages. Damit klärte sich ein zentraler Punkt in Mochizukis Methode. Mochizukis Doktorvater Faltings äußerte sich begeistert, und Optimismus breitete sich aus.

Wenig später kam allerdings die große Enttäuschung. Mit aller bisherigen Arbeit hatte Mochizuki gewissermaßen nur ein Werkstück auf äußerst raffinierter Weise auf dem Amboss zurechtgelegt, um dann mit einem großen Hammer zuschlagen zu können. Wie aber der Hammer zu konstruieren und zu führen sei, das beschreibt er in der vierten IUT-Arbeit.

Diese zu erklären, war die Aufgabe von Chung Pang Mok von der Purdue University sowie Yuichiro Hoshi und Go Yamashita, Institutskollegen von Mochizuki aus Kyoto – drei von den vielleicht fünf Fachleuten weltweit, die überhaupt tief in die Materie eingedrungen sind. Nur sahen sich leider

alle anderen außer Stande, ihrem Vortrag zu folgen. Allgemeine Konfusion herrschte am Nachmittag des vierten Tages. Die Beteiligten waren wie betäubt von der Sturzflut an Fachbegriffen, die über sie hereingebrochen war.

Minhyong Kim führt als eine Ursache für das Scheitern kulturelle Differenzen an. Für japanische Mathematiker sei eine rasche Folge technischer Definitionen in Vorträgen nichts Ungeübtes, im Gegensatz zum interaktiven, dialogischen amerikanischen Präsentationsstil. Und einige dicht beschriebene Folien erforderten in der Tat »etwas Geduld und Konzentration«. Kedlaya dagegen nimmt die Vortragenden in Schutz: »Ab diesem Punkt wird der Stoff einfach deutlich schwerer.«

Was nun? Manche Teilnehmer drücken es optimistisch aus: Man habe zwar nach wie vor keine Ahnung, aber auf einem weit höheren Niveau. Immerhin wisse man jetzt genauer, wo man weiter nachbohren könne. Faltings dagegen glaubt, dass die Frage nicht geklärt werden wird, »es sei denn, Mochizuki schreibt eine lesbare Arbeit«.

Der Meister selbst hat dazu einen ersten Schritt bereits getan: Seit dem 24. Dezember stehen neue Versionen seiner Arbeiten im Netz. Und die Folgekonferenz zum Thema ist für Juli angekündigt – in Kyoto.

Kevin Hartnett ist Wissenschaftsjournalist in Columbia (South Carolina).



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

Expertenkommentare

In Ausgabe 1/2016 benannten neun europäische Experten in einem zweiteiligen Digital-Manifest die Risiken und Chancen von Big-Data-Analysen und Verhaltenssteuerung (Nudging) auf Grundlage von Algorithmen und KI-Systemen. »Spektrum der Wissenschaft« führt die angestoßene Debatte über mögliche Gefahren für Freiheit und Demokratie sowie die richtige Gestaltung unserer digitalen Zukunft fort. Auf dieser Doppelseite drucken wir Auszüge aus Experteninterviews und -kommentaren ab. Sie finden diese und weitere Beiträge außerdem auf www.spektrum.de/t/das-digital-manifest.

Das Digital Manifest

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

JOHANNES GUTENBERG-UNIVERSITÄT
MAINZ, PRESSESTELLE



Fukushima der künstlichen Intelligenz

Aus einem Interview mit dem Philosophen Thomas Metzinger, Professor an der Universität Mainz:

Warum übertragen wir immer mehr Verantwortung auf Algorithmen?

THOMAS METZINGER: Wenn intelligente Systeme in offenen Umwelten erfolgreich agieren sollen, dann werden wir in kleinen Schritten immer größere Teile unserer eigenen Autonomie an sie abgeben müssen. Jeder einzelne dieser Schritte mag uns rational erscheinen. Dadurch sinken aber auch die Transparenz und die Vorhersagbarkeit; technische Pannen können zu Kettenreaktionen führen, die für menschliche Benutzer erst viel zu spät erkennbar sind.

Aber liegt hier nicht ein ganz gewöhnlicher Fall von Dual Use vor: Jede Technologie kann zum Guten wie zum Schlechten dienen?

THOMAS METZINGER: Erstens ist sehr vieles, was »gewöhnlich« ist, nicht da-

mit schon in Ordnung. Eine Analogie: Die meisten von uns haben sich bereits längst an die Tatsache gewöhnt, dass 2016 das eine Prozent der reichsten Menschen über 50 Prozent des weltweiten Vermögens besitzen wird – die andere Hälfte verteilt sich dann wiederum sehr ungleich auf die restlichen 99 Prozent. Wir haben hier eine Zusammenballung wirtschaftlicher und politischer Macht und müssen uns fragen: Gibt es heute noch eine demokratisch gewählte Regierung auf der Welt, die es mit dieser Macht aufnehmen kann? Bei der KI sollten wir eine analoge Entwicklung verhindern, also eine nicht mehr rückgängig zu machende Konzentration kognitiver Kraft. Zweitens gibt es bei KI aber mehrere neue Qualitäten: KI-Technologie könnte irgendwann überhaupt nicht mehr »dienen«, weil sie eben genau nur dann immer besser

wird, wenn wir sie auch autonomer werden lassen. Außerdem könnte die KI – gerade weil sie ja eine »erkennende Technologie« ist – zu ganz anderen Einschätzungen darüber gelangen, was denn überhaupt »gut« und »schlecht« ist. Wenn sie das tut, könnte es für sie rational sein, diese Tatsache vor uns zu verbergen. Man muss verstehen, dass es hier nicht mehr nur um »Technologiefolgenabschätzung« und angewandte Ethik im klassischen Sinn geht. Die autonomer werdende KI und das Internet sind »Metatechnologien«, weil fortgeschrittene KI letztlich selbst zur Erforschung und Entwicklung neuer Technologien verwendet werden kann. Wir gehen deshalb davon aus, dass KI diejenige Technologie ist, von der aktuell und mittelfristig die höchsten Risiken und Chancen ausgehen.

Das vollständige Interview:
www.spektrum.de/news/interview-die-unterschaetzten-risiken-der-kuenstlichen-intelligenz/1377620

Propheten einer digitalen Apokalypse?

Aus einem Kommentar des Informatikers Manfred Broy, Professor an der Technischen Universität München:

Auch Programme der künstlichen Intelligenz werden Zeile für Zeile programmiert, selbst wenn in diesem Zusammenhang Techniken eingesetzt werden, die tatsächlich als »lernende Systeme« bezeichnet werden. Doch dieses »Lernen« ist so weit entfernt vom Lernen beim Menschen wie das Fliegen

von Flugzeugen vom Fliegen der Vögel. Und die künstliche Intelligenz wird immer noch von Wissenschaftlern weiterentwickelt und entwickelt sich nicht selbst weiter.

Die Behauptung, dass »Algorithmen nun Schrift, Sprache und Muster fast so



MIT FRIDL. GEN. VON
MANFRED BROY

gut erkennen können wie Menschen und viele Aufgaben sogar besser lösen«, ist schlicht Unsinn. Es fällt nicht schwer, eine ganze Litanei von Aufgaben zu definieren, die Algorithmen und auch

»Deep Mind« völlig überfordern würden, den normalen Durchschnittsbürger aber, ja selbst Kinder in keiner Weise.

Die Protagonisten der digitalen Apokalypse sollten sich an wissenschaft-

lich gesicherte Aussagen halten. Sie erkennen, dass, auch wenn inzwischen Computer besser Schach spielen als Schachweltmeister, es sich bei den Rechnern um Fachidioten handelt – oder als was würden wir einen Menschen bezeichnen, der brillant Schach spielt, aber sonst zu nichts weiter fähig ist? Auch die Behauptung, dass »heute Algorithmen wissen, was wir tun, was wir denken und wie wir uns fühlen«, ist schlicht und ergreifend falsch. Algorithmen »wissen« schon einmal gar nichts. Sie können höchstens Daten über uns verarbeiten. Wie stark diese Daten tatsächlich unsere Taten, unser Denken und unsere Empfindungen wiedergeben können, ist eine hoch komplizierte Frage. Aber zumindest

nach Stand der heutigen Technik sind die Systeme weit davon entfernt, hier auch nur annähernd das zu leisten, was behauptet wird.

Betrachtet man unsere Welt und die digitale Technik so, wie sie heute ist, so ist die Gefahr der Superintelligenz, auch der digitalen Superintelligenz, nicht zu erkennen. Eher gewinnt man den Eindruck, dass etwas mehr rationale Intelligenz unserer Welt insgesamt nicht schaden würde.

Ein Punkt allerdings ist unstrittig: Digitale Technologien schaffen neue Möglichkeiten. Wenn diese Möglichkeiten in die falschen Hände geraten, führt das zu enormen Gefahren. Aber andererseits ist auch klar – den digitalen Fortschritt wird niemand aufhalten.

Das exponentielle Wachstum der Leistungsfähigkeit digitaler Technologie wird noch ein bis zwei Jahrzehnte andauern. Das Thema ist nicht, sich der digitalen Technologie in den Weg zu stellen oder sie unreflektiert zu verdammen. Die Herausforderung ist, die digitale Technologie in ihrer Nutzung zu gestalten – zu nutzen im Sinne der Menschen, zu gestalten im Sinne unserer Werte. Aber das kann nur gelingen, wenn wir die Möglichkeiten digitaler Technologie realistisch einschätzen und zutreffend darstellen.

Der vollständige Kommentar:

www.spektrum.de/news/meinung-propheten-einer-digitalen-apokalypse/1389513



MIT FRODL. GEN. VON GERHARD WEIKUM

Eine Ethik für Nerds

Aus einem Interview mit dem KI-Entwickler Gerhard Weikum, Direktor des Max-Planck-Instituts für Informatik in Saarbrücken:

Wie beurteilen Sie die Gefahr, dass wir uns zu einer automatisierten Gesellschaft in einer ausgehöhlten Demokratie entwickeln?

GERHARD WEIKUM: Hier sollte man gesellschaftliche und technologische Trends auseinanderhalten. Die Tendenz, dass Bürger unmündiger werden und sich von populistischen Trends manipulieren lassen, gibt es doch schon länger. Technologie verstärkt und beschleunigt solche Trends, aber man kann den Zeitgeist nicht nur auf Technologie abwälzen.

Wo müsste nach Ihrer Ansicht regulierend eingegriffen werden?

GERHARD WEIKUM: Zur Eindämmung des Risikos potenzieller Verhaltensmanipulation gibt es sicher Regulierungsbedarf. Beispielsweise könnte man bei individualisierten Preisen eine starke Kennzeichnungspflicht einführen, und falls es bald auch politische Tagesnachrichten in individuell zugeschnittener Form aufs Handy oder Tablet geben sollte, gilt dies dort erst recht. Parallel dazu muss man aber auch Aufklärungs-

arbeit leisten und das Bewusstsein für die Chancen und Risiken von Big Data verbessern.

Wie sieht die Scientific Community, wie sehen Informatiker, die selbst an der Entwicklung lernender KI-Systeme arbeiten, die anhebende Debatte über mögliche Folgen ihres Tuns?

GERHARD WEIKUM: Technologiefolgenabschätzung und die ethische Dimension sind enorm wichtig; daran müssen sich unbedingt auch Fachwissenschaftler beteiligen. Digitalisierung an sich ist ein evolutionäres Phänomen, das sich schon lange abzeichnet. Aber jetzt erleben wir eine rasante Beschleunigung der technischen Möglichkeiten und Anwendungstrends, so dass wir eben auch die Diskussion um die gesellschaftlichen Auswirkungen stark intensivieren müssen. Wir brauchen eine »Ethik für Nerds«, um einen meiner lokalen Informatikkollegen zu zitieren. An der Universität des Saarlandes zum Beispiel gibt es bereits eine solche Vorlesung, die gemeinsam von der Informatik und der Philosophie getragen wird. Aber das ist natürlich nur ein Baustein von vielen.

Was fehlt im Digital-Manifest aus Ihrer Sicht?

GERHARD WEIKUM: Ein wichtiger Aspekt, der bei den Thesen des Manifests fehlt, ist die Intensivierung der Informatikforschung zu den Themen Sicherheit, Privatsphäre und Vertrauen von Internetdiensten im breiten Sinn, einschließlich Suche und sozialer Medien. Hier gibt es nämlich auch viele technisch-algorithmische Herausforderungen. Dabei ist es essenziell, dass diese Forschung im öffentlichen Raum stattfindet, so dass die Ergebnisse und die sich möglicherweise ergebenden Handlungsempfehlungen für jedermann zugänglich sind.

Der allerwichtigste Aspekt ist aber wohl die Aufklärungsarbeit vor allem bei jungen Internetnutzern. Die gesellschaftliche Diskussion zu Big Data muss intensiviert werden, und sie muss dann auch die Breite der Nutzer erreichen. Die besten Werkzeuge zur Datentransparenz und zum Schutz der Privatsphäre werden nicht helfen, wenn sie keine Akzeptanz bei den Nutzern haben.

Das vollständige Interview:

www.spektrum.de/news/interview-big-data-lernende-ki-systeme-und-regulierung-des-internets/1380168

Wenn der Bauch das Gehirn krank macht

Manche psychischen und neurologischen Störungen gehen mit einer abweichenden Zusammensetzung der Darmbakterien einher. Das eröffnet einen ungewöhnlichen Behandlungsweg.

Von Valérie Daugé, Mathilde Jaglin, Laurent Naudon und Sylvie Rabot

Unser Darm beherbergt nach herkömmlicher Auffassung annähernd 100 Billionen (10^{14}) Bakterien. Sie umfassen rund 1000 verschiedene Arten und damit eine enorme genetische Vielfalt. Fachleute sprechen oft vom Mikrobiom des Verdauungstrakts oder von unserer inneren Mikrobiota. Der erste Begriff bezeichnet insbesondere die Gesamtheit der Gene jener Bakterien, der zweite die zugehörigen Organismen insgesamt.

Mediziner begreifen die Darmflora inzwischen als ein regelrechtes Organ an der Schnittstelle zwischen Verdauungstrakt und aufgenommener Nahrung. Denn sie hilft nicht nur diese aufzuschließen. Vielmehr tauschen die Bakterien mit der Darmwand auch molekulare Signale aus und kommunizieren so über das Blut-, Nerven- und Immunsystem mit dem gesamten Organismus – nicht zuletzt mit dem Gehirn.

Eine Bestandsaufnahme der Gene der Darmflora und der von ihr produzierten Substanzen kam dank der immer ausgefeilteren Analysemethoden in den letzten zehn Jahren gut voran. Dabei fanden Forscher eine Menge Beziehungen zwischen unserer inneren Mikrobiota und verschiedensten Vorgängen im Körper (siehe SdW 2/2016, S. 28).

Offenbar gehen sogar bestimmte Hirnerkrankungen mit einem gestörten Gleichgewicht in der Darmflora – einer Dysbiose oder allgemeiner Dysbakterie – einher. Hierzu zählen als hepatische Enzephalopathie bezeichnete Hirnfunktionsstörungen, die sich unter anderem in Angstzuständen, auffälligen Stimmungen und kognitiven Einbußen äußern. Die Symptomatik tritt auf, wenn die Leber den Körper wegen eines Stoffwechseldefekts ungenügend entgiftet, aber zugleich ist dafür eine bestimmte Zusammensetzung der Darmflora typisch. Dann produziert diese ungewöhnlich viel schädliche Stoffe wie Ammoniak, die eigentlich entsorgt werden müssen, sich nun jedoch in Blut und Gehirn anreichern.

Solche neuropsychiatrischen Beschwerden lassen sich durch Antibiotika sowie durch »Präbiotika« lindern, da beide auf die Darmflora Einfluss nehmen. Unter Präbiotika versteht man unverdauliche Nahrungsbestandteile, so genannte Ballaststoffe, die Aktivität und Wachstum günstiger Darmbakterien anregen. Als »Probiotika« werden hingegen Nahrungsmittel und Präparate mit speziellen Bakterien und Hefen bezeichnet.

Auf Grund dieser Erfahrung fragen sich Mediziner, inwieweit Wechselwirkungen zwischen Darm und Gehirn auch bei gesunden Menschen eine Rolle spielen. Und sie überlegen, ob die Darmflora bei manchen anderen Erkrankungen des Zentralnervensystems ebenfalls aus dem Gleichgewicht geraten ist. Aber wie sollen Bakterien vom Bauch her auf das Gehirn Einfluss nehmen können?

Diese Hintergründe erforschen Wissenschaftler auf zwei Wegen. Sie arbeiten entweder mit keimfreien – axenischen (nach griechisch: xenos = der Fremde, der Gast) – Nagetieren, die keine Darmflora besitzen. Oder sie manipulieren gezielt eine bestehende Mikrobiota von Tier oder Mensch. Dazu setzen sie etwa Antibiotika ein, was die Bakterienzusammensetzung gravierend verändern kann. In manchen Studien erproben sie die Auswirkungen zugeführter Prä- oder Probiotika beziehungsweise ausgewählter spezieller Bakterien. Manchmal übertragen sie sogar Kotextrakte.

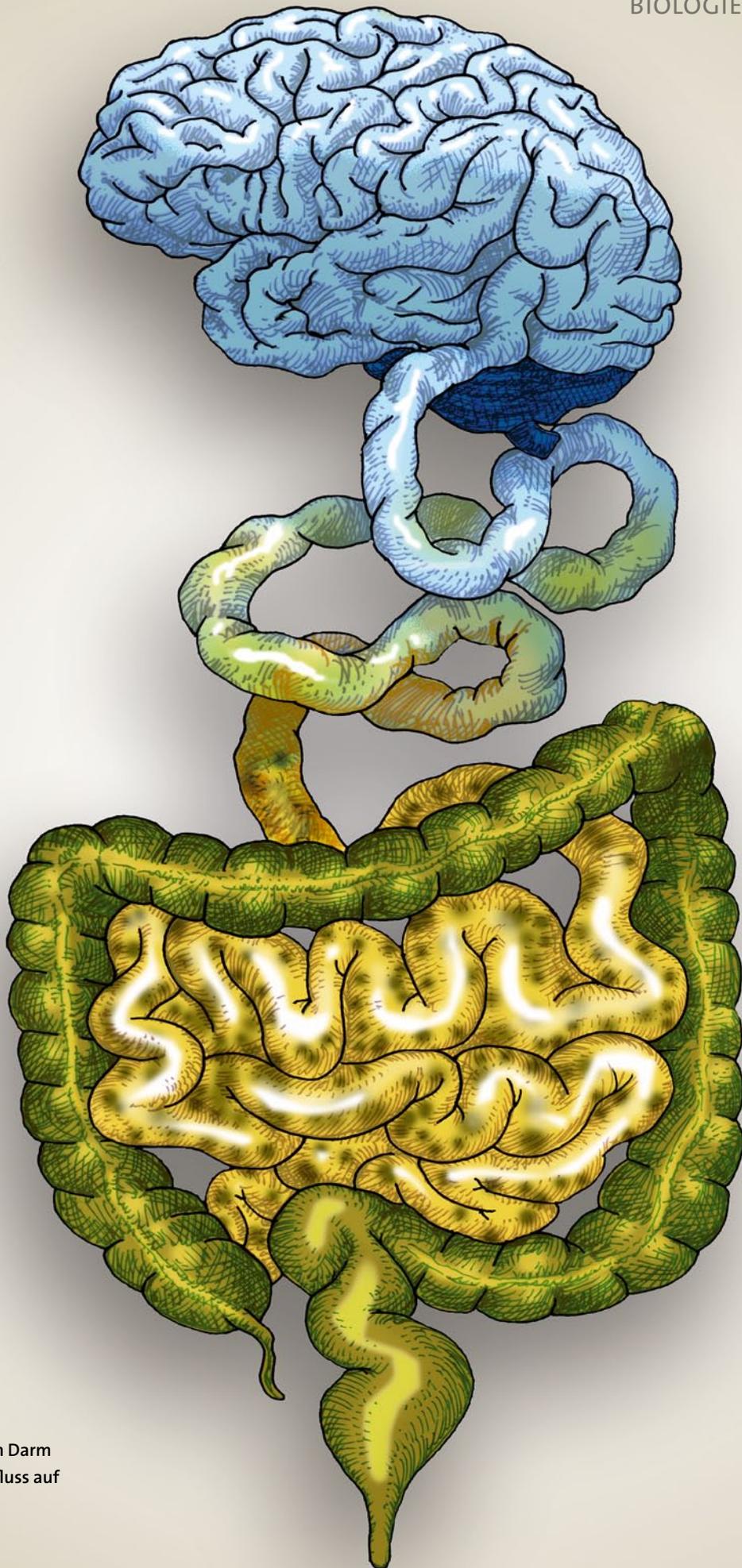
AUF EINEN BLICK

DIE DARM-HIRN-ACHSE

1 Die Darmflora beeinflusst **Verhalten** und **Stimmung**, indem ihre Bakterien über die **Blutbahn** und das **Nervensystem** mit dem Gehirn kommunizieren.

2 Einige psychische Erkrankungen und Entwicklungsstörungen von Hirnfunktionen könnten mit einer abweichenden Zusammensetzung dieser Mikrobiota zusammenhängen. Der Verdacht besteht etwa für bestimmte Formen von **Autismus**, **Depression** und **Angsterkrankungen**.

3 Eine Reihe von Studien, bisher meist an Tieren, lassen hoffen, dass manche dieser Krankheiten und Defekte gemildert werden können, wenn man das **mikrobielle Gleichgewicht** im Darm normalisiert.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ANDREAS KZADKOWSKY

Die Mikrowelt im Darm
hat ungeahnten Einfluss auf
Hirnfunktionen.

Völlig steril gehaltene Tiere zeigen neben typischen Fehlfunktionen von Organen einige Verhaltensabweichungen. Die Frage lautet, inwieweit sich beides mit bestimmten Bakterien korrigieren lässt. Wohl am auffälligsten ist die übermäßige Stressanfälligkeit solcher Nager. Das entdeckte 2004 ein Forscherteam um Nobuyuki Sudo von der Universität von Kyushu (Japan). Es sperrte Mäuse eine Stunde lang in einem engen Gefäß ein. Direkt nach dieser Behandlung hatten keimfreie Tiere doppelt so viel vom Stresshormon Kortikosteron gebildet wie Artgenossen mit normaler Darmbesiedelung. Wissenschaftler von der McMaster University in Hamilton (Kanada) und vom University College Cork (Irland) konnten den Effekt bestätigen. Wir selbst fanden ähnliche Unterschiede später bei Ratten.

Emotionalität abmildern

Die Stressreaktion in belastenden Situationen gleicht sich der von normal gehaltenen Artgenossen an, wenn bislang axenische Mäuse und Ratten probiotische Bakterien erhalten. Das belegen Studien von 2011 und 2012, zum einen von Javier Bravo und Kollegen in Cork, zum anderen von Afifa Ait-Belgnaoui, die in Toulouse beim dortigen Institut national de la recherche agronomique (INRA) arbeitet. Somit wirkt eine Darmmikrobiota offenbar emotional ausgleichend.

Auf Verhaltensebene äußert sich eine Reaktion auf Stress durch Unterschiede etwa in der Kampf- oder Fluchtbereitschaft sowie in der Ängstlichkeit. Besonders für Letzteres gibt es bewährte, viel erprobte Tests für Nager. Zum Beispiel setzt man die Tiere hellem Licht aus oder bringt sie auf eine freie Fläche, wo sie sich nirgends verstecken können, und beobachtet, was sie dann machen: wie lange sie erstarren, ob sie vorsichtig die Umwelt erkunden und so weiter. Solche Situationen lassen sich in vielfältiger Weise abwandeln und durch Wahl der äußeren Parameter mehr oder weniger Furcht einflößend gestalten. Tiere ohne Darmflora benehmen sich dabei fast immer ungewöhnlich. Allerdings ist das

Verhalten artabhängig und sogar je nach Zuchtstamm verschieden. Es weist nicht einmal stets in dieselbe Richtung, ist also insgesamt nicht so eindeutig wie die Stresshormonwerte. Deswegen diskutieren Experten die Ergebnisse teils noch kontrovers. Immerhin pflegt sich das Verhalten von keimfreien Tieren in Angst einflößenden Situationen stets zu normalisieren, wenn man ihnen eine Darmflora verabreicht (siehe »Mit Bakterien gegen Stress«, rechts).

Dass auch beim Menschen Darmbakterien Emotionen beeinflussen können, zeigten 2013 die Medizinerin Kirsten Tillisch und ihre Kollegen von der University of California in Los Angeles. In ihrer Studie nahmen Frauen einen Monat lang einen mit speziellen Probiotika angereicherten Joghurt zu sich. Die Maßnahme bewirkte, dass bestimmte Hirnregionen von ihnen auf negativ behaftete Stimuli, etwa furchtsame oder wütende Gesichter, weniger stark reagierten als bei Frauen der Vergleichsgruppe. Unter anderem maßen die Forscherinnen dabei per Magnetresonanztomografie veränderte neuronale Aktivitäten in Gebieten, die Sinneseindrücke verarbeiten beziehungsweise Emotionen kontrollieren.

Im gleichen Jahr wies das Team von Timothy Dinan aus Cork soziale Defizite bei Mäusen ohne Darmflora nach. Die Nager nehmen weniger Kontakt auf und meiden Fremde stärker als normalerweise. Wenn sie die Wahl haben, ziehen sie sich lieber in eine leere Kammer zurück, als einen Raum aufzusuchen, in dem schon ein Artgenosse sitzt, wie andere Mäuse es machen würden. Notfalls bevorzugen sie ein ihnen bekanntes Tier, statt sich wie sonst zuerst mit einem fremden zu befassen. Offensichtlich haben sie übermäßig viel Angst vor Neuem und wenig sozialen Antrieb. Erhalten dieselben Mäuse dann Darmbakterien, wird ihr soziales Verhalten bald ganz normal. Wir selbst beobachteten 2014 bei Ratten: Axenische Tiere meiden nach Möglichkeit fremde Artgenossen, während solche mit Darmflora eher Kontakt suchen.

Welche Mechanismen dahinterstehen, wissen die Forscher zwar noch nicht im Einzelnen. Jedoch gibt es bereits Hinweise auf diverse Unterschiede insbesondere auf Molekülebene. Unter anderem scheinen neuronale Botenstoffe (Neurotransmitter wie Dopamin, Serotonin oder Noradrenalin) und Nervenwachstumsfaktoren betroffen. Deren Konzentration verändert sich in einigen Hirnregionen, wenn bislang keimfreie Tiere Probiotika erhalten.

Es liegt von daher nahe, auch für einige neuronale Entwicklungsstörungen und psychische Erkrankungen Verbindungen mit der Darmflora zu prüfen. Im Fall einer hepatischen Enzephalopathie, die komplexe neuropsychiatrische Symptome hervorruft, sind solche Effekte wie gesagt erwiesen. Für andere Erscheinungen, beispielsweise affektive Störungen oder Behinderungen aus dem Autismus-Spektrum, gibt es zumindest schon zahlreiche Hinweise darauf.

Wie mehrere Studien nachwiesen, unterscheidet sich die Darmflora autistischer Kinder von der anderer in bestimm-



Mit Bakterien gegen Stress

Mäuse und Ratten ohne Darmflora benehmen sich in herausfordernden und belastenden Situationen anders als Artgenossen mit vorhandener Mikrobiota. Sie bilden dann außerdem deutlich mehr Kortikosteron, ein Stresshormon.



LAURENT NAUDON

Je ängstlicher ein Tier, umso länger zögert es, von einer Plattform zu springen (oben) oder sich in die hellen und freien Bereiche einer Testvorrichtung vorzuwagen (rechts).



LAURENT NAUDON

ter Weise. Das lässt sich etwa an der Stoffwechselaktivität der Mikrobiota des Darms zeigen, was an dafür typischen Spuren im Stuhl und auch im Urin erkennbar ist. Allerdings leiden viele betroffene Kinder häufig an Magen-Darm-Störungen und bekommen deswegen in jungen Jahren öfter Breitbandantibiotika oder müssen streng Diät halten. Schon das allein mag für das bakterielle Ungleichgewicht im Darm verantwortlich sein.

Dennoch spricht eine 2013 erschienene Studie dafür, dass die innere Mikrobiota bei Autismus eine Rolle spielen könnten. Ein Forscherteam um Sarkis Mazmanian am California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena hat Mäuse untersucht, die autismusähnliche Symptome zeigen. Sie ziehen sich sozial zurück, fallen durch stereotype Bewegungen auf, sind besonders ängstlich und haben sogar Defizite in der stimmlichen Kommunikation. Aber auch die Zusammensetzung und die Stoffwechselaktivität ihrer Darmflora weisen Besonderheiten auf, die durchaus an diejenigen bei autistischen Kindern erinnern. Als die Forscher solche Mäuse mit einem Stamm von *Bacteroides fragilis* behandelten, normalisierte sich deren Mikrobiota – und zugleich wurden die Verhaltenssymptome schwächer.

Ein paar Ergebnisse dieser Art liegen sogar schon für Menschen vor. So führten Richard Sandler vom Rush University Medical Center in Chicago und Sydney Finegold von der University of California in Los Angeles mit ihren Mitarbeitern bereits im Jahr 2000 eine klinische Studie an einigen vier bis sieben Jahre alten autistischen Kindern durch, bei denen sich die Behinderung erst relativ spät, mit über einhalb Jah-

Beides gibt sich, wenn man den Tieren eine Darmflora angedeihen lässt. Dafür genügt schon die Gabe von Probiotika, insbesondere bestimmten Laktobakterien. Allerdings muss das in einer sehr frühen Entwicklungsphase geschehen.

ren, gezeigt hatte. In diesen Fällen bestand der Verdacht, dass frühere umfangreiche Antibiotikabehandlungen der Darmflora zugesetzt hatten. Die Mediziner gaben den Kindern das Antibiotikum Vancomycin, das nur bestimmte Gruppen von Darmbakterien angreift, die bei Autisten vermehrt vorkommen (wie übrigens auch bei den »autistischen« Mäusen). Danach wurden die Verhaltensauffälligkeiten der Kinder schwächer, und ihre Ausdrucksfähigkeit nahm zu. Diese postulierten Zusammenhänge wirklich zu belegen und zu verstehen, wird jedoch noch viele Untersuchungen erfordern.

Probiotika gegen Depression?

Wie steht es um affektive Störungen, beispielsweise Depressionen? Bei Nagetieren kann an Schwermut erinnerndes Verhalten auftreten, wenn sie früh von der Mutter getrennt werden oder wenn man bei erwachsenen Tieren den Geruchssinn ausschaltet, der für die soziale und Umweltorientierung dieser Arten besonders wichtig ist. Dass in solch einem Zustand die Zusammensetzung der Darmflora nicht stimmt, haben mehrere Arbeiten nachgewiesen.

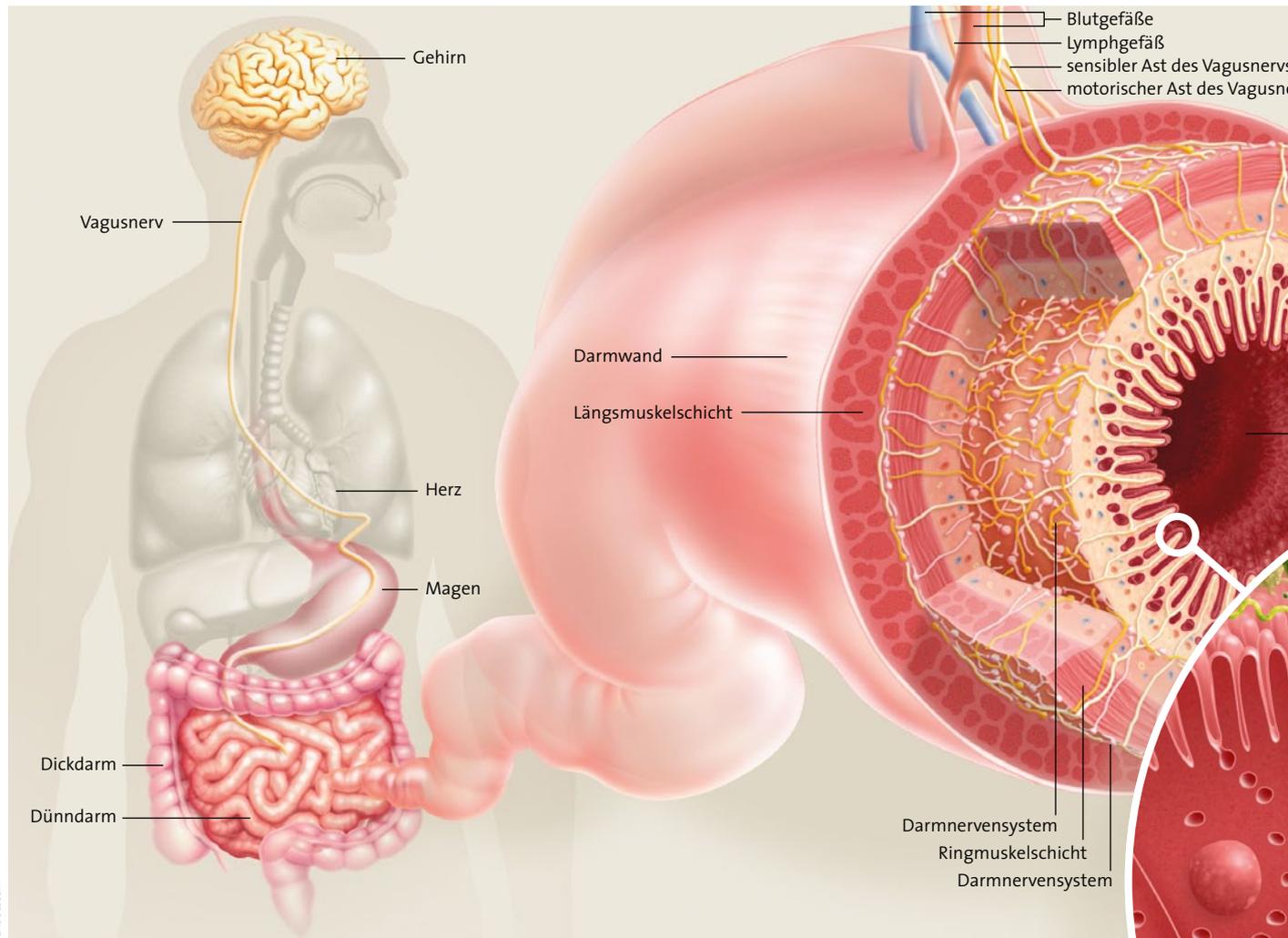
Für Menschen zeigten Forscher der Shimane-Universität in Izumo (Japan) 2012, dass das Antibiotikum Minocyclin (ein Tetracyclin) Depressionssymptome lindern kann: Traurigkeit, Schlaflosigkeit und Angst. Die Darmflora der Patienten haben die japanischen Forscher allerdings nicht näher untersucht. So wissen wir nicht, ob die Besserungen auf Veränderungen an dieser Stelle zurückgingen oder auf die entzündungshemmenden und sonstigen für Neurone günstigen Eigenschaften des Medikaments. Jedoch profitieren

depressive Patienten anderen klinischen Studien zufolge von Probiotika: Die Ängste gehen zurück, die Stimmung wird besser, und der emotionale Zustand stabilisiert sich.

Hierzu gibt es wiederum vergleichbare Befunde an Nagern. Die Gabe des Probiotikums *Bifidobacterium infantis*

hilft Ratten, die vorzeitig der Mutter entrisen wurden, gegen »depressive« Zustände. Und bemerkenswerterweise werden sie nicht nur agiler, sondern es normalisieren sich auch verschiedene physiologische Parameter, die vorher ungewöhnlich waren. Dazu zählen Immunfunktionen und die

Kontakte der Darmflora zum Gehirn



Die Darmwand besteht aus mehreren Schichten (rechts im großen Bild). Von der innersten, der Schleimhautschicht, ragen unzählige Zotten in das Darmlumen hinein. Auf ihnen sitzen die Epithelzellen, die Verdauungssekrete und Schleim bilden und Nahrungsstoffe aufnehmen. Darunter werden die Zotten von vielen feinen Blutgefäßen und Nervenenden durchzogen. Zudem befinden sich hier Immunzellen (Bildausschnitt unten).

Im Prinzip kann die Darmflora das Gehirn auf mehreren Wegen beeinflussen. Bakterielle Moleküle können Darmepithelzellen passieren und dann direkt in etwas tiefer liegende feine Blutgefäße übertreten, von denen aus die Substanzen mit dem Blutstrom ins Gehirn gelangen. Oder sie stimulieren Ausläufer von sensorischen Neuronen des »Darmnervensystems«, die daraufhin insbesondere via Vagusnerv Signale zum Gehirn

schicken. Des Weiteren aktivieren Moleküle von Darmbakterien Drüsenzellen (endokrine Zellen), die zwischen den Epithelzellen liegen; diese schütten daraufhin in die Darmschleimhaut Neuropeptide aus, die ebenfalls auf den beiden beschriebenen Wegen wirken können. Auf Moleküle der Darmflora reagieren auch Immunzellen in der Darmschleimhaut, die Ausläufer zwischen die Epithelzellen strecken; sie bilden dann entzündungsfördernde Zytokine, die im Gehirn weitere Entzündungskaskaden auslösen können.

Falls das Darmepithel bei Krankheit oder stressbedingt durchlässig wird, gelangen bakterielle Substanzen noch leichter in die tieferen Schichten. So kommen etwa auch giftige Zerstellungsprodukte in den Körper.

Konzentration des Neurotransmitters Noradrenalin. An diesem Botenstoff mangelt es bei einer Depression häufig.

Obwohl der Nutzen einer Behandlung mit speziellen Bakterien gegen Depressionen längst nicht zweifelsfrei belegt ist, spricht die Gruppe um Timothy Dinan aus Cork be-

reits von einer möglichen neuen Klasse von Probiotika: den »Psychobiotika«. Das wären lebende Mikroorganismen für den Darm, die psychiatrische Symptome abschwächen helfen – indem sie Moleküle bilden, die direkt oder indirekt über Zwischenschritte auf das Gehirn wirken.

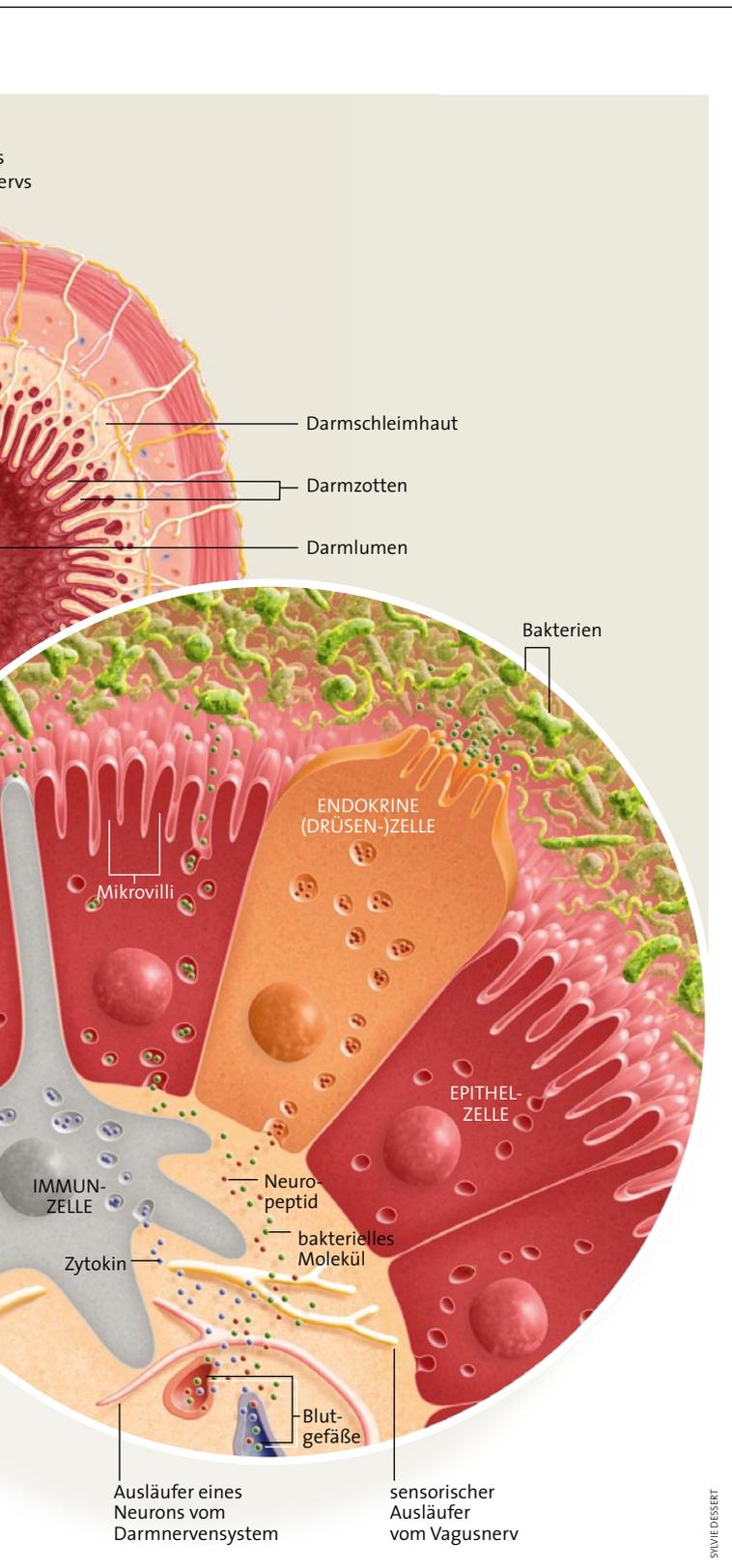
Aber wie könnte eine Brücke zwischen Darm und Gehirn aussehen? Genaues ist auch dazu nicht bekannt, jedoch gibt es Anhaltspunkte. Grundsätzlich kommen Moleküle aus zwei Quellen in Frage: zum einen Stoffwechselprodukte der Bakterien, die diese in den Darm abgeben, etwa Fettsäuren, die bei Fermentierungsprozessen im Zuge der Verdauung anfallen; zum anderen Moleküle von Hülle, Wimpfern oder Flagellen der Bakterien. Beide Typen von Molekülen könnten auf verschiedene Weise – direkt oder über Vermittler – zum Zuge kommen. Manche mögen ins Blut gelangen und damit selbst direkt zum Gehirn. Teils könnten sie jedoch feine Nervenenden in der Darmwand aktivieren, die dann über den Vagus-Eingeweidenerf mit dem Gehirn kommunizieren. Oder sie regen Zellen der Darmschleimhaut an, ihrerseits Stoffe ins Blut oder an die Nervenenden abzugeben (siehe »Kontakte der Darmflora zum Gehirn«, links).

»Autismus« durch Fettsäuren von Darmbakterien

Allein an Molekülen, die direkt zum Gehirn transportiert werden könnten, liefern Darmbakterien bereits eine reiche Palette. Durch Infektionen oder Antibiotikabehandlungen, die auf die Darmflora Einfluss nehmen, können manche Substanzen im Übermaß entstehen, die außerhalb des Darms giftig wirken. Bei der erwähnten hepatischen Enzephalopathie wird der Körper unter anderem mit Ammoniak und kurzkettigen Fettsäuren übersättigt, was besonders das Gehirn nicht verträgt. Forscher um Derrick MacFabe von der University of Western Ontario in London (Kanada) konnten 2010 bei Ratten vorübergehend »autistisches« Verhalten hervorrufen, indem sie in deren Gehirn kurzkettige Fettsäuren bakteriellen Ursprungs sowie bestimmte Abkömmlinge davon injizierten, wie Azetat oder Propionat.

Mehr noch: Darmbakterien bilden Moleküle, die menschlichen Neurotransmittern gleichen. Ob diese direkt Nervenenden in der Darmschleimhaut aktivieren, ist noch nicht nachgewiesen. Man weiß allerdings, dass Nervenbahnen an der Kommunikation zwischen Darmflora und Gehirn teilnehmen. Irgendwie müssen die Bakterien also auf das Nervensystem in der Darmwand wirken, das über den Vagusnerv Kontakt zum Gehirn hat. Laut mehreren Studien an Mäusen nimmt die Erregbarkeit von sensorischen Neuronen des Darms bei Zufuhr probiotischer Bakterien ab. 2011 wurde auch nachgewiesen, dass bei durchtrenntem Vagusnerv manche der sonst nach Probiotikagabe beobachteten positiven Veränderungen im Verhalten und bei Stresssituationen nicht stattfinden. Dazu zählen Verbesserungen der Ängstlichkeit bisher axenischer Mäuse, die eine Darmflora erhalten.

Nach anderen Untersuchungen wirken nicht alle Moleküle der Darmbakterien selbst direkt auf die Nervenenden



im Darm ein. Manche davon beeinflussen endokrine Zellen in der Darmwand. Diese Drüsenzellen bilden daraufhin Neuropeptide, die nun ihrerseits Neuronenaktivitäten verändern. Das kann vor Ort im Darm geschehen, aber via Blutkreislauf auch im Gehirn. Unter anderem helfen die Neuropeptide, Sättigungsgefühle und Angstreaktionen zu regulieren.

Die Darmdrüsenzellen stehen mit den Bakterien über fingerartige Ausstülpungen, die ins Darmlumen hineinragen, in direktem Kontakt. Auf diesen Fingern tragen sie molekulare Rezeptoren. Letztere lassen sich in Zellkulturen von Molekülen aus der Bakterienhülle aktivieren, woraufhin die sekretorischen Zellen das für die Verdauungsorgane wichtige Peptid Cholecystokinin absondern: ein Neurohormon, das im Gehirn zum Beispiel beim Sättigungsgefühl eine Rolle spielt. Ein anderes vielseitiges Molekül, das Neuropeptid Y, nimmt im Blut von Ratten zu, wenn die Nager mit einer Mischung von Prä- und Probiotika gefüttert werden. Dieses Neuropeptid hilft unter anderem, Hungergefühl und Angst zu steuern. Nach einer 2011 veröffentlichten Studie bilden Mäuse mehr Hirnrezeptoren dafür aus, wenn ihre Mutter sie in den ersten Wochen sehr fürsorglich pflegt. Solche Tiere können später besser mit Stress und Angst umgehen.

Gut eingestellte Darmflora: Hilfreich für gesunde Hirnentwicklung

Die Mikrobiota im Darm beeinflusst sogar die Schmerzempfindlichkeit. Wenn Nager einen probiotischen Stamm der Bakterienart *Lactobacillus acidophilus* zu sich nehmen, wächst die Anzahl von Rezeptoren für Opiate und Cannabinoide auf den endokrinen Zellen des Darms. Das setzt zugleich die Schmerzempfindung der Tiere herab – doch auf welche Weise, bleibt zu untersuchen.

Überdies manipuliert die Darmflora Immunzellen in der Darmschleimhaut. Herrscht im Verdauungsorgan ein bakterielles Ungleichgewicht oder machen sich pathogene Bakterien breit, bilden diese Zellen unter bestimmten Umständen Zytokine, die Entzündungen hervorrufen. Manchmal erreichen solche Moleküle das Gehirn und lösen dort die Produktion anderer entzündungsfördernder Zytokine durch hirneigene Zellen der Mikroglia aus. Dabei gerät das Nervengewebe in Mitleidenschaft. Infolgedessen treten Verhaltensänderungen auf, wie kein Interesse an der Umwelt, sozialen Kontakten und Fressen oder sogar kognitive Störungen.

Bestimmte probiotische Bakterien, so zeigten Studien an Ratten, helfen dagegen. Dank ihnen sinkt die Konzentration der betreffenden Zytokine im Blut, und gewisse notwendige Neurotransmitter in der Hirnrinde werden nicht mehr zu schnell abgebaut. Eine andere Untersuchung erwies: Wenn die Tiere Stresssituationen ausgesetzt sind, kann *Lactobacillus farciminis* dafür sorgen, dass die Menge entzündungsfördernder Zytokine im Gehirn nicht so rasch ansteigt. Vermutlich wirken die Bakterien einer zunehmenden Durchlässigkeit der Darmwand infolge von Stress entgegen – wodurch weniger bakterielle Bestandteile zu Immunzellen gelangen, die dann keine Entzündungstoffe mehr herstellen.

Insgesamt wissen wir noch viel zu wenig über die Rolle der Darmflora bei psychischen Erkrankungen und Hirnentwicklungsstörungen. Für einige von ihnen besteht bereits der Verdacht, dass die Zusammensetzung der Darmbakterien dabei zumindest in manchen Fällen eine Rolle spielt: etwa beim Autismus-Spektrum, bei affektiven Störungen wie Depressionen und bei extremen Stimmungsschwankungen, bei Angststörungen oder bei pathologischem Essverhalten. Doch wir müssen die Mechanismen noch besser verstehen, mit denen unsere innere Mikrobiota mit dem Gehirn kommuniziert. Besonderes Augenmerk sollte der frühesten Kindheit gelten, in der sich diese Bakteriengemeinschaft aufbaut – und in der auch das Gehirn entscheidende Entwicklungen erfährt. Offenbar benötigen manche Hirnstrukturen zu ihrer Reifung eine gut eingestellte Darmflora. Wohl deswegen lässt sich die hohe Stressanfälligkeit axenischer Nagetiere mittels bestimmter Mikroben nur dann beheben, wenn die Behandlung bald nach der Geburt erfolgt.

Vor allem zur Darmflora von möglicherweise betroffenen Menschen gibt es längst noch nicht genug Daten, um gute Therapien zu entwickeln. Hier hoffen wir auf weitere Fortschritte bei Metagenomanalysen. Damit würde eine Bestimmung unseres inneren Mikrobioms leichter. Bereits recht ermutigend sind die Studien an Nagetieren mit Pro- und Präbiotika. Kämen sogar Stuhlübertragungen als Behandlung in Frage? Eine Studie von 2011 stimmt optimistisch: Wissenschaftler um Premysl Bercik von der McMaster University in Hamilton (Ontario, Kanada) haben die Darmflora von Mäusen eines ängstlichen Stamms durch die einer forschenden Zuchtlinie ausgetauscht. Und wirklich machte das neue Innenleben die Tiere mutiger. ~

DIE AUTOREN



Valérie Daugé, Mathilde Jaglin, Laurent Naudon und Sylvie Rabot (von links) forschen am Institut Micalis (UMR1319) beim Institut national de la recherche agronomique (INRA) in Jouy-en-Josas südwestlich von Paris.

QUELLEN

- Crumeyrolle-Arias, M. et al.:** Absence of the Gut Microbiota Enhances Anxiety-Like Behavior and Neuroendocrine Response to Acute Stress in Rats. In: *Psychoneuroendocrinology* 42, S. 207–217, 2014
- Gilbert, J.A. et al.:** Toward Effective Probiotics for Autism and Other Neurodevelopmental Disorders. In: *Cell* 155, S. 1446–1448, 2013
- Rabot, S. et al.:** Impact of the Gut Microbiota on the Neuroendocrine and Behavioural Responses to Stress in Rodents. In: *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids* 23, D116, 2016

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1396790

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
E-Mail: service@spektrum.de

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



Stoppt das Denguefieber!

Mit Hilfe eines natürlich vorkommenden Bakteriums machen Forscher Stechmücken gegen das Denguevirus immun. So wollen sie die sich stark ausbreitende tropische Seuche eindämmen, gegen die es sonst kaum Mittel gibt.

Von Scott O'Neill

Der beste Zeitpunkt, in Nordaustralien Stechmücken freizulassen, ist vormittags. Später am Tag könnten stärkere Winde die Insekten wegwehen und damit jede Hoffnung zunichtemachen, dass sie einen Paarungspartner finden. Und davor müsste man den Mitarbeitern, die mir dabei helfen, die Behälter mit Moskitos zu verteilen, Überstunden bezahlen. So bestieg ich an einem Januarmorgen des Jahres 2011, mitten im australischen Hochsommer, meinen weißen Lieferwagen, auf dessen Rückbank Tausende von Stechmücken in Plastikdosen verstaut waren.

In den folgenden drei Monaten unternahmen wir einmal pro Woche solche Fahrten, um Stechmücken frei zu lassen. Wir konzentrierten uns dabei auf zwei Stadtteile von Cairns, einer bei Touristen beliebten Küstenstadt am berühmten Großen Barriereriff. Bei jedem vierten Haus – die Bewohner hatten sich zuvor mit einer Teilnahme an unserer Studie einverstanden erklärt – holten wir einen Moskitobehälter aus dem Wagen, zogen den Deckel ab und ließen die rund 50 Insekten darin fliegen.

Dabei handelte es sich keineswegs um gewöhnliche Stechmücken. Jede davon war mit einem Bakterium namens *Wolbachia* infiziert, das in den Zellen von Insekten lebt (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 56). *Wolbachia* verfügt über eine für unsere Zwecke höchst interessante Eigenschaft: Es hindert offenbar das Denguevirus daran, sich im Körpergewebe von Stechmücken zu vermehren. Folglich übertragen die Insekten beim Blutsaugen das Virus nicht auf ihre Opfer, und die Krankheit kann sich nicht ausbreiten.

BILL MAVER



BILL MAYER

Die Stechmücken mit einem Bakterium zu infizieren, um Denguefieber zu bekämpfen, mag nach einem umständlichen Umweg klingen. Aber es gibt kaum Alternativen dazu. An Denguefieber, das wegen der massiven Gelenk- und Gliederschmerzen auch Knochenbrecherfieber heißt, erkranken laut neueren Schätzungen jedes Jahr 390 Millionen Menschen. Weil es keine Heilung oder Behandlung gibt, geht man bisher hauptsächlich gegen die Ägyptische Tigermücke (*Aedes aegypti*) vor, die das Denguevirus überträgt. Übliche Insektenvernichtungsmittel wie Temephos erweisen sich jedoch inzwischen als ziemlich wirkungslos, da die Stechmücken dagegen resistent geworden sind. Moskitonetze über dem Bett nutzen ebenfalls nicht viel gegen die tagaktive Tigermücke. Als eine der vielversprechendsten Waffen gegen die Ausbreitung des Denguefiebers gilt zurzeit die Strategie, Wolbachien innerhalb wilder Stechmückenpopulationen zu verbreiten. Ein solcher Ansatz könnte auch Malaria und andere von Stechmücken übertragene Krankheiten unter Kontrolle bringen.

Es liegt allerdings nicht unbedingt nahe, *Wolbachia* zur Bekämpfung des Denguefiebers einzusetzen. Das Bakterium kommt normalerweise nicht in jenen Stechmücken vor, die gewöhnlich das Denguevirus übertragen. Tatsächlich mussten wir diese erst in unserem Labor künstlich mit der Mikrobe infizieren. Mit anderen Worten: Wir benutzen *Wolbachia*, um die Stechmücken gegen das Virus zu immunisieren. Dann setzen wir die Moskitos in freier Natur aus – in der Hoffnung, dass sie das Bakterium auf ihre Nachkommen übertragen. Für die Insekten und die Umwelt ist *Wolbachia* weitgehend harmlos, außer dass es die Eiproduktion der Mückenweibchen beeinträchtigen kann. Der potenzielle Gewinn ist hingegen eindeutig: Falls die mit *Wolbachia* infizierten Moskitos in der freien Natur die Vorherrschaft erlangen, sollten deutlich weniger Menschen an Denguefieber erkranken.

Stechmücken zählen zu den Tieren, welche die meisten Todesfälle unter den Menschen weltweit verursachen. Dem Gelbfieber, das ebenfalls von der Ägyptischen Tigermücke übertragen wird, fielen während des spanisch-amerikani-

schen Kriegs 1898 mehr US-Soldaten zum Opfer als feindlichem Beschuss. Malaria, hervorgerufen durch einen per Mückenstich weitergegebenen Parasiten, tötete allein 2012 ungefähr 627000 Menschen. Heute sorgt die Ägyptische Tigermücke für eine schnelle Verbreitung des Denguevirus über den gesamten Globus. Laut der Weltgesundheitsorganisation besteht für etwa die Hälfte der Weltbevölkerung ein gewisses Risiko, an Denguefieber zu erkranken.

Die Ägyptische Tigermücke erkennt man an den weißen Streifen auf ihren Beinen und dem an eine Leier erinnernden Muster auf dem Vorderkörper (Thorax). Sie vermag sich in jeder Art von stehendem Wasser zu vermehren. Das macht es so schwierig, ihre Vermehrung einzudämmen. Diese Mücke kommt in tropischen und subtropischen Regionen auf der ganzen Welt vor – in Afrika ebenso wie in Amerika, im östlichen Mittelmeerraum, in Südostasien und in westpazifischen Regionen. Die Insekten tragen das Denguevirus jedoch nicht von Natur aus in sich; sie erhalten es vielmehr von uns.

Die Ansteckungskette unterbrechen

Der Infektionsweg ist einfach. Die Moskitoweibchen stechen Menschen, weil sie die Proteine aus unserem Blut benötigen, um Eier zu produzieren – die Männchen tun das nicht. Saugt eine Mücke das Blut eines an Denguefieber erkrankten Patienten und dann nach acht bis 12 Tagen, in denen sich das Virus in ihr vermehrt, wieder das eines anderen Menschen, überträgt es das Virus auf letzteren. *Wolbachia* unterbricht diese Ereigniskette, indem es die Virusvermehrung blockiert.

Auf *Wolbachia* stießen Forscher erstmals 1924 während des Studiums von Stechmücken in Haushalten. Etwa 50 Jahre lang interessierten sie sich jedoch wenig für dieses Bakterium. Dann stellte sich heraus, dass es unter bestimmten Umständen das Schlüpfen von Larven aus den Stechmückeneiern verhindert. Folglich könnte sich durch den Einsatz der Mikrobe die Vermehrung der Moskitos kontrollieren lassen. In den 1990er Jahren entdeckten Wissenschaftler dann, dass einige *Wolbachia*-Stämme auch einen früheren Tod der Stechmücken bewirken. Damit eröffnete sich ein weiterer Weg, die Krankheitsübertragung durch diese Insekten einzudämmen.

Ich hörte erstmals während meiner Doktorandenzeit Mitte der 1980er Jahre von *Wolbachia*. Schon damals fragte ich mich, ob wir dieses Bakterium nutzen könnten, um die Übertragung von Krankheiten durch Stechmücken auf den Menschen zu unterbinden. Wenn es uns gelänge, die Lebensdauer der Insekten zu verkürzen – und sei es nur in bescheidenem Ausmaß –, dann ließe sich damit bereits das menschliche Erkrankungsrisiko merklich herabsetzen.

Das Problem bestand darin, dass *Wolbachia* kein ausgeprägtes Faible für die Ägyptische Tigermücke besitzt. Zwar beherbergen bis zu 60 Prozent aller Insektenarten die Mikrobe, darunter auch einige Stechmücken, die Menschenblut saugen. Die Infektion wandert jedoch nicht so einfach von einer Mückenart zur nächsten. Folglich galt es herauszufinden, wie sich verschiedene *Wolbachia*-Stämme von einem ande-

AUF EINEN BLICK

EIN BAKTERIUM ALS WAFFE GEGEN VIREN

1 Forscher versuchen das **Denguefieber** mit Hilfe von *Wolbachia*, einem verbreiteten Bakterium, zu bekämpfen. Es hindert das Denguevirus, sich in den Körpern der **Stechmücken** zu vermehren, welche die Krankheit übertragen. Es gibt kaum andere Mittel gegen das Denguevirus.

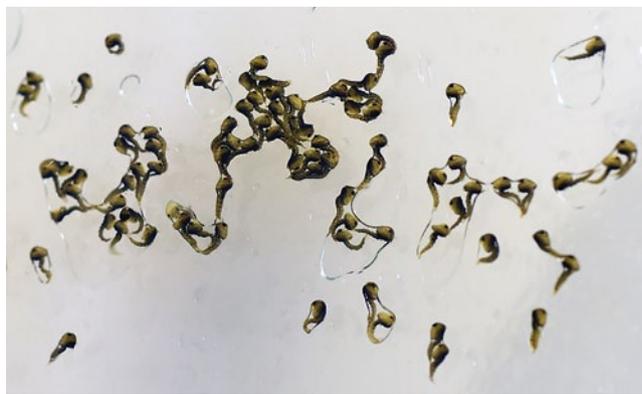
2 Obwohl das Bakterium unter Insekten weit verbreitet ist, befällt es normalerweise nicht die **Ägyptische Tigermücke** (*Aedes aegypti*), die als Hauptüberträger des Denguefiebers gilt. Daher infizieren Forscher diese Stechmücke im Labor mit *Wolbachia* und setzen sie anschließend in die freie Natur aus.

3 Paaren sich die *Wolbachia*-Moskitos, geben sie das Bakterium an **nachfolgende Generationen** weiter. Gelingt das Vorhaben, werden letztlich Massen wild lebender Moskitos *Wolbachia* beherbergen und damit keine Dengueviren mehr beim Blutsaugen übertragen können.



Ägyptische Tigermücken können bei ihren Blutmahlzeiten Dengueviren aufnehmen und weitergeben. Sind sie jedoch mit dem Bakterium *Wolbachia* infiziert, übertragen sie das Virus nicht mehr. Forscher züchten solche Stechmücken (rechts) und setzen sie aus, in der Hoffnung, dass diese die wilde Mückenpopulation verdrängen und so die Ausbreitung der Seuche stoppen.

GETTY IMAGES / PHOTO RESEARCHERS / JAMES GATHANY



GETTY IMAGES / AFP PHOTO / CHRISTOPHE SIMON



GETTY IMAGES / AFP PHOTO / CHRISTOPHE SIMON

ren Insekt – der Fruchtfliege – auf mit Dengueviren verseuchte Moskitos übertragen lassen. Das war ein mühsamer Prozess, der uns mehr als ein Jahrzehnt lang beschäftigte.

Stellen Sie sich vor, Sie stechen eine Stricknadel in einen Ballon und sollen sie dann so entfernen, dass der Ballon keine Luft verliert. Dies beschreibt recht gut die Situation, mit der man beim Infizieren von Stechmückeneiern mit *Wolbachia* konfrontiert ist. Meine Mitarbeiter im Labor benutzen hierfür mikroskopisch feine Nadeln, mit denen sie der Fruchtfliege das Bakterium entnehmen und es anschließend direkt in ein junges Stechmückenei spritzen. Anfangs zerplatzten jedoch die Eier ständig. Wir mussten uns an vielen Tausenden davon versuchen, bis es schließlich klappte.

Alles eine Frage der Gewöhnung

Danach galt es, andere Probleme zu meistern. So verschwanden die *Wolbachia* oft nach ein oder zwei Generationen der Stechmücken. Damit würden sich aber die Bakterien in der freien Natur nicht von selbst verbreiten, so wie es uns eigentlich vorschwebte. Wir kamen letztlich zu dem Schluss, dass wir die Mikroben erst an ihr neues Wirtsmilieu gewöhnen mussten. Hierzu extrahierten wir *Wolbachia* aus Fruchtfliegen und ließen sie in Zelllinien von Stechmücken wachsen. 2005 hatten wir es dann geschafft: Moskitos, die wir mit derart konditionierten *Wolbachia* infiziert hatten, gaben das Bakterium über 13 Generationen hinweg weiter. Und wie erhofft verkürzte zumindest ein Stamm das Leben der Ägyptischen Tigermücke. Zudem stellte sich aber heraus, dass *Wolbachia* sogar eine bessere Waffe gegen Dengue ist, als wir ursprünglich dachten. Aus Gründen, die wir noch nicht ganz



GETTY IMAGES / AFP PHOTO / CHRISTOPHE SIMON

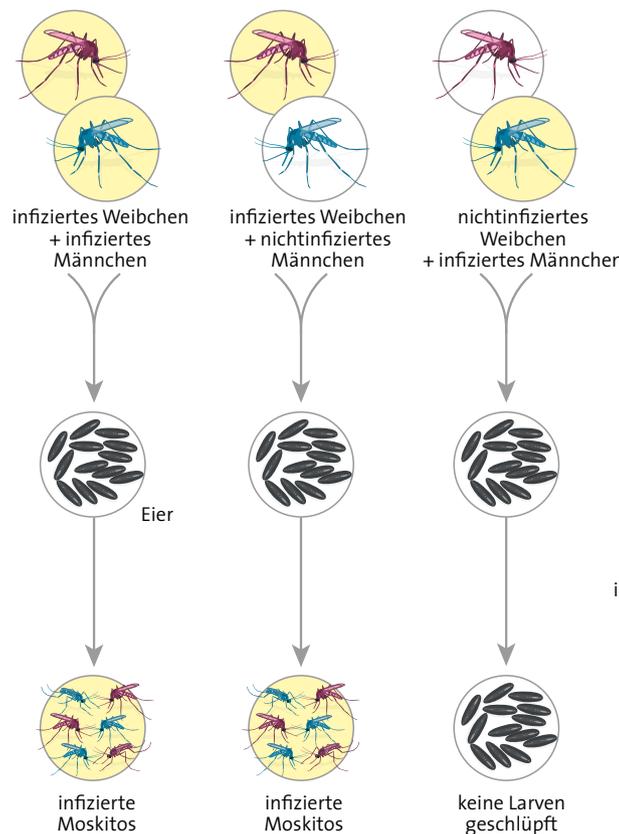
verstehen, bereitet es dem Virus Schwierigkeiten, sich in Stechmücken zu vermehren, die mit den Bakterien infiziert sind. Das entdeckten wir einige Jahre nach unserer erfolgreichen Übertragung von *Wolbachia* auf *A. aegypti*. Damals ergab sich aus anderen Arbeiten, an denen ich beteiligt war, dass die Mikrobe bei Fruchtfliegen die Replikation des Drosophila-C-Virus blockiert. Mein Team injizierte daraufhin das Denguevirus direkt in die mit *Wolbachia* infizierten Stechmücken, und zu unserer großen Freude konnte es sich nun nicht mehr vermehren. Wir wiederholten das Experiment mehrfach – jedes Mal mit Dutzenden von Ägyptischen Tigermücken – und erzielten stets übereinstimmende Ergebnisse.

Zurzeit verwenden wir einen *Wolbachia*-Stamm, der die Übertragung des Denguevirus verhindert, aber die Lebensdauer der Stechmücken nicht verkürzt. Schließlich sollen unsere Stechmücken so lang wie möglich leben und dabei viele *Wolbachia* enthaltende Eier legen. Schon seit meiner Studienzeit wissen wir, dass infizierte Mückenweibchen das

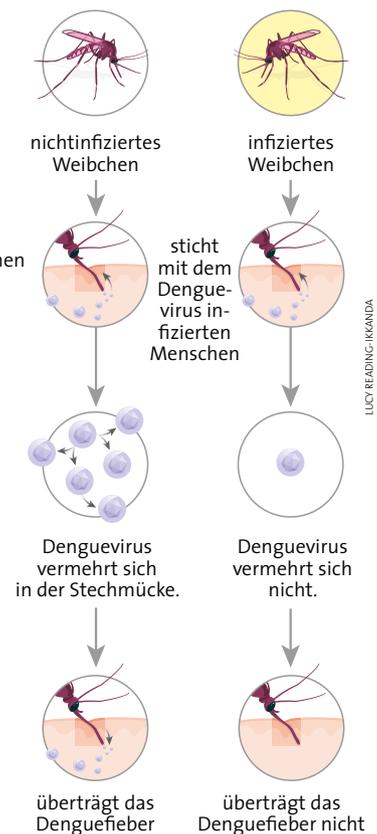
Das Geheimnis ihres Erfolgs

Es gibt keinen Impfstoff gegen das Denguefieber. Infiziert man jedoch die das Virus verbreitenden Stechmücken mit einem Bakterium namens *Wolbachia*, blockiert dies die Fähigkeit der Insekten, die Krankheit auf Menschen zu übertragen. Die Mikrobe gelangt dabei in männliche wie weibliche Moskitos: Infizierte Weibchen legen Eier, die das Bakterium beherbergen, und wenn sich infizierte Männchen mit Weibchen ohne *Wolbachia* paaren, schlüpfen keine Larven aus den Eiern. Wissenschaftler setzen nun *Wolbachia*-Weibchen in Australien, Vietnam, Indonesien und Brasilien in die freie Natur aus.

Wie sich *Wolbachia* ausbreitet ...



... und das Denguefieber eindämmt.



LUCY READING-IRKANDA

Bakterium an fast alle ihre Nachkommen weitergeben. Und aus von infizierten Männchen befruchteten Eiern schlüpfen keine Larven. Es braucht daher meist nicht allzu viele Generationen nach dem Einbringen von *Wolbachia* in eine Population von Moskitos, bis nahezu alle darin das Bakterium in sich tragen (siehe Kasten »Das Geheimnis ihres Erfolgs«).

Langwierige Überzeugungsarbeit

In einem unserer Experimente in Nordaustralien führte das Freisetzen von zirka zehn Stechmücken pro Haus und Woche über zehn Wochen dazu, dass schließlich bei mehr als 80 Prozent der wild lebenden Moskitos in dem betreffenden Gebiet *Wolbachia* vorkam. Und auch noch zwei Monate nach dem Ende der Aktion ließ sich das Bakterium nachweisen. Da es derart effizient von einer Generation zur anderen weitergegeben wird, dürfte es sich aus eigener Kraft ausreichend verbreiten, weshalb keine wiederholten Freisetzungen nötig sein sollten.

Vor solchen Freilandexperimenten mussten wir uns allerdings mit vielen Vorbehalten in der Bevölkerung auseinandersetzen. Monatelang gingen wir von Tür zu Tür und baten um das Einverständnis, die Stechmücken in der Nähe bewohnter Häuser freizulassen. Wir organisierten Informationsveranstaltungen und führten spontane Gespräche vor Einkaufszentren. Außerdem überprüften australische Bundesbehörden

die Sicherheit unserer Methode, bevor sie uns die Genehmigung erteilten, die infizierten Mücken zu verbreiten.

Für Menschen ist *Wolbachia* offenbar ungefährlich. Unsere Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass das Bakterium nicht auf Gestochene übergehen kann, denn es ist zu groß, um durch den Speicheldrüsengang hindurch in den menschlichen Blutstrom zu gelangen. Wir suchten außerdem bei den freiwilligen Versuchspersonen, die sich von unseren Moskitos haben stechen lassen, nach Antikörpern. Doch auch nach drei Jahren solcher Tests konnten wir keinerlei Anzeichen für die Existenz von *Wolbachia* im menschlichen Organismus finden. Immer wieder haben unsere Labormitarbeiter und Freiwilligen dafür eine Viertelstunde mit hochgekrempelten Ärmeln in den Käfigen verbracht, damit sich die Stechmücken vollsaugen konnten.

Es gibt auch keinerlei Hinweise, dass *Wolbachia*-Moskitos schädlich für die Umwelt sind. Seit wir 2011 mit ihrer Freisetzung begonnen hatten, untersuchten wir Tiere und Insekten, die mit diesen Stechmücken in Kontakt kommen. Dabei bestätigte sich erneut, dass dieses Bakterium ausschließlich in den Zellen von Insekten und anderen Gliederfüßern lebt. Darüber hinaus dürfte *Wolbachia* kaum überleben, selbst wenn es doch einen Weg in das Blut des Menschen oder anderer Säugetiere fände. Tatsächlich ist *Wolbachia* bereits in vielen anderen Mückenarten nachgewiesen worden, einschließlich

solchen, die regelmäßig Menschen stechen – ohne erkennbare Folgen. Auch Spinnen und Geckos, die *Wolbachia*-Moskitos gefressen haben, zeigen keine negativen Auswirkungen, und im Gewebe dieser Tiere lassen sich diese Bakterien nicht entdecken.

Vor den ersten Freisetzungen der *Wolbachia*-Moskitos beauftragten wir eine unabhängige Risikoabschätzung durch die Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australiens nationale Forschungsbehörde. Dafür identifizierten und bewerteten Expertenteams denkbare Gefahren, von ökologischen Risiken bis hin zu Auswirkungen auf die örtlichen Bürgerschaften. Die Agentur prüfte vorliegende Studien und befragte zudem Evolutionsbiologen. Gewichtige Aspekte kamen dabei auf den Tisch: Veränderungen in der Stechmückenhäufigkeit, eine mögliche Weiterentwicklung des Denguevirus, Belästigung der Anwohner durch eine wachsende Anzahl Blut saugender Moskitos und Veränderungen in ihrer Wahrnehmung der mit dem Denguefieber verbundenen Risiken. Der Abschlussbericht kommt jedoch ebenfalls zum Ergebnis, dass die Freisetzung von *Wolbachia*-Moskitos keine nennenswerte Gefährdung von Mensch und Umwelt mit sich bringt.

Wechsel zum großen Maßstab

Zusätzlich zu den Feldversuchen, die wir in den vergangenen Jahren in Australien durchgeführt haben, laufen nun auch Studien in Vietnam und Indonesien an. Außerdem haben wir im September 2014 mit dem Freisetzen von Stechmücken in Brasilien begonnen. Wie wir festgestellt haben, kann *Wolbachia* aus eigenen Kräften in wild lebenden Moskitopopulationen innerhalb kleiner Gemeinden heimisch werden. Nun gehen wir daran, das Gleiche in größeren Arealen zu versuchen. Eine Ausdehnung des Maßstabs könnte jedoch andere Vorgehensweisen erfordern. Beispielsweise wird es zu arbeitsaufwändig sein, ausreichend viele *Wolbachia*-Moskitos heranzuziehen. In Cairns testen wir jetzt daher, wie gut das Aussetzen von infizierten Mückeneiern wirkt.

Inzwischen versuchen andere Forscher, alternative Ansätze zum Eindämmen der Stechmücken zu entwickeln. Einige setzen etwa genetisch veränderte Männchen aus, deren Spermazellen einen todbringenden Erbfaktor enthalten: Wenn sich diese in der Natur mit Weibchen paaren, werden die Nachkommen sterben (Spektrum der Wissenschaft 8/2012, S. 34). Die innovative Strategie könnte möglicherweise einen Durchbruch bringen, sich aber auch als kostspielig erweisen. Um im großen Maßstab Wirkung zu entfalten, müssten vielleicht fortlaufend solche modifizierten Moskitos ausgesetzt werden, damit nicht aus nahe gelegenen Regionen genetisch unveränderte Stechmücken einwandern und die Population immer wieder auffüllen. Außerdem kritisieren Gegner genetischer Modifikationen grundsätzlich den Einsatz transgener Stechmücken.

Bei einer auf *Wolbachia* basierenden Bekämpfung des Denguefiebers entstehen Kosten dagegen nur zu Beginn der Kampagne: Nach der anfänglichen Investition für das Produ-

zieren infizierter Stechmücken läuft der Prozess von allein weiter. Dieser Ansatz könnte sich damit als ein relativ kostengünstiger Weg erweisen, was besonders für arme tropische Länder zählt, die von der Krankheit am stärksten betroffen sind. Ein weiterer Vorteil ist, dass er ohne Genmodifikation auskommt – auch wenn es wegen der aufwändigen Überzeugungsarbeit unter den Anwohnern hinsichtlich der Sicherheit unserer Strategie dennoch Jahre gedauert hatte, bis wir starten konnten.

Noch liegt eine große Hürde vor uns: zu erfassen, wie sehr das Denguefieber durch unsere *Wolbachia*-Moskitos in den Testgemeinden tatsächlich zurückgeht. Aus verschiedenen Gründen dürfte sich dies als schwierig erweisen. So mangelt es in den Gebieten, in denen wir arbeiten, an verlässlichen Daten über die Häufigkeit des Denguefiebers. Außerdem können die Infektionsraten von Jahr zu Jahr stark schwanken. Um die Wirksamkeit unserer Methode zu belegen, müssen wir die Erkrankungshäufigkeit in jenen Gebieten, in denen wir *Wolbachia*-Moskitos freigesetzt haben, mit solchen ohne den Eingriff vergleichen. Hierzu benötigen wir eine Vielzahl von Blutproben, was mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden ist.

Wir glauben trotzdem, dass sich die Arbeit lohnen wird, und das nicht nur zum Bekämpfen des Denguefiebers. Diese Moskitos – oder vielmehr die Bakterien in ihnen – scheinen sich als viel versprechende Waffe gegen andere Krankheiten zu eignen. Wir haben eindeutige Hinweise, dass *Wolbachia* auch die Fähigkeit von Stechmücken vermindern könnte, Gelbfieber zu übertragen sowie das so genannte Chikungunyafieber, das im Juli 2014 erstmals auf dem US-amerikanischen Festland aufgetreten ist. Einige Forscher versuchen außerdem, *Wolbachia*-Moskitos einzusetzen, um die Übertragung von Malaria und Lymphatischer Filariasis, einem stark verunstaltenden Wurmbefall, einzudämmen. Vielleicht wird dann eines Tages ein Moskitostich tatsächlich nichts anderes mehr zurücklassen als eine juckende Stelle in der Haut. ~

DER AUTOR



Der Biologe **Scott O'Neill** forscht an der Monash University in Australien und leitet die internationale Initiative »Eliminate Dengue«.

QUELLEN

- Caragata, E.P. et al.:** Dietary Cholesterol Modulates Pathogen Blocking by *Wolbachia*. In: PLOS Pathogens 9, e1003459, 2013
- Ferguson, N.M. et al.:** Modeling the Impact on Virus Transmission of *Wolbachia*-Mediated Blocking of Dengue Virus Infection of *Aedes aegypti*. In: Science Translational Medicine 7, 279ra37, 2015
- Frentiu, F.D. et al.:** Limited Dengue Virus Replication in Field-Collected *Aedes aegypti* Mosquitoes Infected with *Wolbachia*. In: PLOS Neglected Tropical Diseases 8, e2688, 2014

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1396794

DIE SERIE IM ÜBERBLICK



100 JAHRE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE

- | | | |
|--------|---|------------------|
| Teil 1 | ▶ Der Glanz des Genies
<i>Brian Greene</i>
Einsteins Weg zur
allgemeinen Relativitätstheorie
<i>Michel Janssen, Jürgen Renn</i> | Oktober 2015 |
| 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>
Alles nur im Kopf
<i>Sabine Hossenfelder</i> | Januar 2016 |
| Teil 5 | ▶ Wie vermisst man ein
Schwarzes Loch?
<i>Dimitrios Psaltis, Shepard S. Doeleman</i> | Februar 2016 |
| Teil 6 | ▶ Sind Zeitreisen möglich?
<i>Tim Folger</i>
Hier irrte Einstein
<i>Lawrence M. Krauss</i> | März 2016 |

BERNHARD SCHMUTZER 1931 / PUBLIC DOMAIN (1)

RAUMZEIT-PARADOXE

Sind Zeitreisen möglich?

In die Zukunft können wir uns bereits bewegen. Ein Besuch in der Vergangenheit hingegen ist eine wesentlich kniffligere Angelegenheit.

Von Tim Folger

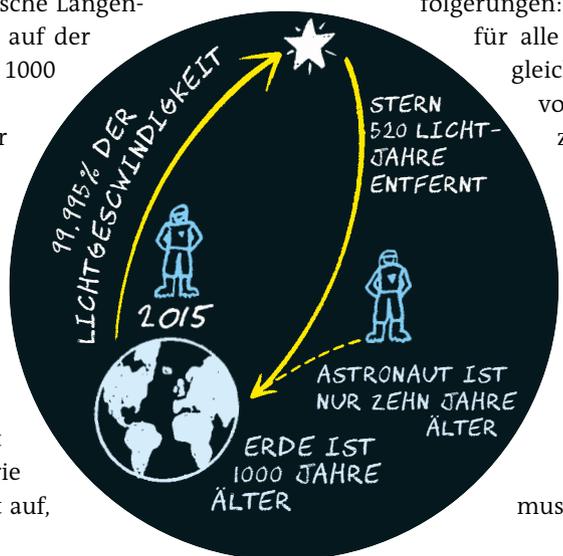
Wenn die vierdimensionale Raumzeit (hier durch ein dreidimensionales Gitter dargestellt) auf besondere Weise verzerrt wird, kann das weit entfernte Bereiche im All verknüpfen und so Reisen in die Vergangenheit ermöglichen – zumindest theoretisch.

Im Jahr 1895 veröffentlichte der Engländer H. G. Wells seinen ersten Roman »Die Zeitmaschine«. Einige Jahre später endete nicht nur die sechs Jahrzehnte währende Regentschaft der britischen Königin Victoria, sondern auch die zwei Jahrhunderte alte newtonsche Physik: Als Albert Einstein 1905 seine spezielle Relativitätstheorie vorstellte, warf er die überlieferte Vorstellung von Raum und Zeit über den Haufen. Etwas, was zuvor nur in der Fantasie von Sciencefiction-Autoren wie Wells existierte, war nun möglich: Reisen in die Zukunft. Gemäß Newtons Vorstellung verlief die Zeit überall gleichmäßig. Sie verging niemals schneller oder langsamer. Für Einstein dagegen war Zeit relativ.

Zeitreisen sind nicht nur möglich, sie haben sogar schon stattgefunden – wenn auch nicht so, wie Wells es sich vorgestellt hatte. Den bisherigen Rekord hält der Raumfahrer Sergei Konstantinowitsch Krikaljow. Im Verlauf seiner Karriere hat der russische Kosmonaut 803 Tage im Weltraum verbracht. Wie Einstein bewies, vergeht die Zeit für Objekte in Bewegung langsamer als für solche, die sich relativ dazu in Ruhe befinden. An Bord der Raumstation Mir raste Krikaljow mit 27 000 Kilometern pro Stunde um die Erde. Insgesamt ist der Kosmonaut dadurch weniger gealtert als seine am Boden gebliebenen Mitmenschen – und zwar den 48. Teil einer Sekunde. Anders ausgedrückt ist Krikaljow also eine 48stel Sekunde in die Zukunft gereist.

Größere Geschwindigkeiten und Entfernungen machen den Effekt offensichtlicher. Verließe ein Astronaut die Erde für einen Rundflug mit 99,995 Prozent der Lichtgeschwindigkeit zum 520 Lichtjahre entfernten Stern Beteigeuze und kehrte ebenso rasant zurück, so würde er aus seiner Sicht für diese Reise insgesamt gerade einmal zehn Jahre benötigen – dem fast lichtschnellen Raumfahrer käme die Strecke durch die hierbei auftretende relativistische Längenkontraktion viel kürzer vor. Aber auf der Erde wären inzwischen mehr als 1000 Jahre vergangen.

Sekundenbruchteile oder sogar Jahrhunderte in die Zukunft zu springen, ist theoretisch also möglich, trotz praktischer technischer Hürden. In die Vergangenheit zu reisen, ist dagegen erheblich schwieriger. In Einsteins spezieller Relativitätstheorie war es sogar unmöglich, bis der Physiker nach einem weiteren Jahrzehnt seine allgemeine Relativitätstheorie präsentierte. Sie hob dieses Verbot auf, zumindest auf dem Papier. Wie allerdings tatsächlich jemand rückwärts durch die Zeit reisen könnte, ist ein ungelöstes Problem, da die allgemeine Relativitätstheorie viele verschiedene Lösungen besitzt. Sie entspre-



Ein Astronaut, der mit 99,995 Prozent der Lichtgeschwindigkeit zu einem 520 Lichtjahre entfernten Stern reisen würde, wäre bei seiner Rückkehr aus seiner Sicht nur um zehn Jahre gealtert. Die irdische Gesellschaft hingegen befände sich 1000 Jahre in der Zukunft.

AUF EINEN BLICK

ZWISCHEN SCIENCE UND FICTION

- 1 Wer sich sehr schnell bewegt, altert laut Relativitätstheorie langsamer als seine ruhende Umgebung. Das entspricht einer **Reise in die Zukunft ohne Wiederkehr**.
- 2 Zumindest mathematisch ist es auch denkbar, bestimmte **Strukturen der Raumzeit** zu benutzen, um sich in die Vergangenheit zu bewegen.
- 3 Allerdings verhindern die **Naturgesetze** unter Umständen, dass solche Phänomene real auftreten. Beliebige Streifzüge durch die Zeit wären dann **praktisch unmöglich**.

chen jeweils Universen mit unterschiedlichen Eigenschaften, und nur einige erlauben solche Reisen.

Ob irgendeine dieser Lösungen tatsächlich unseren eigenen Kosmos beschreibt, ist eine offene Frage, die zudem weitere grundlegende Rätsel aufwirft. Wie sehr müssten wir an den Grundlagen der Physik drehen, damit Reisen in die Vergangenheit möglich sind? Und verhindert das All vielleicht auf irgendeine andere Weise solche Ausflüge, selbst wenn sie laut Einsteins Gleichungen erlaubt sind? Die theoretischen Physiker setzen sich mit solchen höchst spekulativen Fragen keineswegs deshalb auseinander, weil sie tatsächlich an Reisen in die Vergangenheit glauben, wie wir sie aus der Sciencefiction kennen. Vielmehr führt dieses Nachdenken zu erstaunlichen Erkenntnissen über die Natur des Universums, in dem wir leben – und vielleicht sogar darüber, wie es entstanden ist.

Mit seiner speziellen Relativitätstheorie machte Einstein die Zeit verformbar. Er gelangte durch die Analyse zweier ganz grundlegender Ideen zu seinen revolutionären Schlussfolgerungen: Jedwedes Gesetz der Physik muss für alle Beobachter im Universum stets gleich sein, und zwar ganz unabhängig von ihrem Bewegungszustand. Die zweite Überlegung war, dass die Geschwindigkeit des Lichts ebenfalls eine unveränderliche Größe sein müsse, wo und wie auch immer man sie bestimmt. Denn wenn für jeden die gleichen physikalischen Gesetze gelten, müssen alle bei einer Messung der Lichtgeschwindigkeit zu ein und demselben Ergebnis kommen.

Für dieses universelle Tempolimit musste Einstein jedoch zwei tief in der Alltagserfahrung verwurzelte Annahmen über Bord werfen. Nun durften unterschiedliche Beobachter sowohl bei der Messung von Längen als auch von Zeitintervallen zu verschiedenen Ergebnissen kommen. Eine

Uhr, die an einem vorbeisaust, tickt langsamer als ein Zeitgeber, der sich in Ruhe befindet. Und ganz ähnlich ist die Länge eines vorbeifliegenden Lineals kleiner als die eines identischen, das stillhält. Doch für einen Beobachter, der sich mit einem der Gegenstände mitbewegt, tickt die Uhr ganz normal und hat auch das Lineal seine übliche Länge.

Bei gewöhnlichen Verhältnissen sind die Raum und Zeit verzerrenden Effekte der speziellen Relativitätstheorie vernachlässigbar klein. Doch wenn sich etwas mit einem beträchtlichen Teil der Lichtgeschwindigkeit bewegt, sind sie nicht länger zu übersehen. Das zeigte sich inzwischen bei vielen Experimenten. So ist etwa die Lebensdauer eines instabilen Teilchens, des Myons, erheblich größer, wenn es sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegt.

Zurück in die Vergangenheit

Raumfahrer und Myonen können also in die Zukunft reisen. Lässt sich die Richtung auch umkehren? Der berühmte österreichische Mathematiker und Logiker Kurt Gödel war der Erste, der mit Hilfe der allgemeinen Relativitätstheorie ein Universum entwarf, in dem Reisen in die Vergangenheit möglich sind. Er präsentierte das theoretische Modell seinem engen Freund Einstein als Geschenk zu dessen 70. Geburtstag. Es hat zwei besondere Eigenschaften: Einerseits rotiert es, was den Kollaps durch die Schwerkraft der enthaltenen Materie verhindert. Einstein wünschte sich von jedem kosmologischen Modell eine solche Stabilität. Zum anderen erlaubt es Reisen in die Vergangenheit, was bei dem Besenknuten wiederum ein tiefes Unbehagen auslöste. In Gödels Kosmos kann ein Astronaut immer geradeaus fliegen und so wieder zu seinem Ursprungsort zurückkehren – aber zu einem Zeitpunkt in der Vergangenheit. Solche Bahnen nennen Physiker »geschlossene zeitartige Kurven«.

Eine derartige Kurve kehrt zeitversetzt zu ihrem vierdimensionalen Anfang zurück. In Gödels rotierendem Universum umrundet diese Bahn das ganze All, ähnlich wie der Äquator die Erdkugel. Physiker haben sich seither eine ganze Reihe von geschlossenen zeitartigen Kurven ausgedacht, die Reisen in die Vergangenheit erlauben, jedenfalls in der Theorie. Ein realer Flug entlang einer solchen Strecke wäre allerdings völlig unspektakulär. Der Raumfahrer würde das Weltall mit Sternen und Planeten ganz normal an sich vorbeiziehen sehen, und für ihn würde auch die Zeit wie gewohnt vergehen. Anders als in einigen Filmen würden sich also beispielsweise nicht die Uhrzeiger an Bord rückwärtsdrehen. Und trotzdem käme er in seiner eigenen Vergangenheit an.

Die mögliche Existenz solcher Kurven führt zu paradoxen Szenarien. Wie kann man die Vergangenheit ändern, wenn

sie doch schon geschehen ist? Die Anhänger der Kausalität dürfte beruhigen, dass Astronomen keinerlei Hinweis auf ein rotierendes Universum gefunden haben. Gödel selbst hat offenbar erfolglos Galaxienkataloge auf Anzeichen durchforstet, die seine Theorie stützen würden. Er hat zwar kein realistisches Modell des Universums entwickelt, aber immerhin gezeigt, dass geschlossene zeitartige Kurven vollkommen im Einklang mit den Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie sind. Die Formeln verbieten Reisen in die Vergangenheit also nicht. Neuerdings ersinnen Zeitreise-enthusiasten auch Möglichkeiten, die mit lokalen Krümmungen der Raumzeit auskommen. Gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie verzerren Planeten, Sterne, Galaxien und andere massereiche Körper die Raumzeit. Das wiederum beeinflusst die Bewegung dieser Objekte. In extremen Fällen könnte sich die Raumzeit so stark verbiegen, dass sie einen Weg von der Gegenwart zur Vergangenheit erschafft.

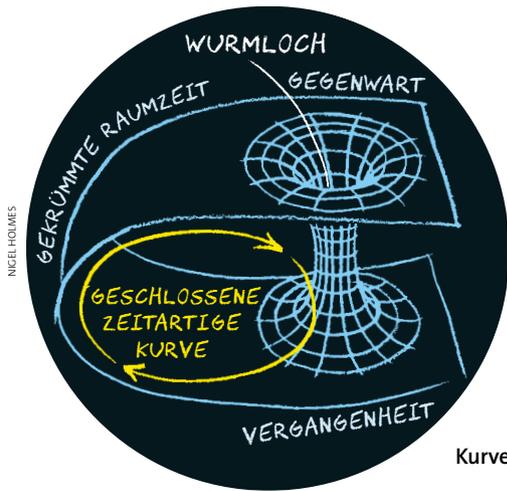
Theoretiker haben einige exotische Mechanismen vorgeschlagen, um solche Pfade durch die Zeit zu legen. In einer 1991 veröffentlichten Arbeit zeigte der US-Astrophysiker J. Richard Gott von der Princeton University, wie kosmische Strings – unendlich lange Strukturen, dünner als ein Atom, die im jungen Universum entstanden sein könnten – an ihren Überschneidungen geschlossene zeitartige Kurven möglich machen. Und Kip Thorne vom California Institute of Techno-



NIGEL HOLMES Einstein zeigte in seiner speziellen Relativitätstheorie, dass ein Objekt, das sich bewegt, ruhenden Beobachtern verkürzt erscheint. Auch die Zeit vergeht in Bewegung weniger schnell.



Der russische Kosmonaut Konstantinowitsch Krikaljow verbrachte insgesamt 803 Tage mit hoher Geschwindigkeit im Erdborbit. Dadurch reiste er effektiv eine 48stel Sekunde in die Zukunft.



Ein »Wormloch« verknüpft weit entfernte Bereiche von Raum und Zeit, indem es die Raumzeit derart stark krümmt, dass eine direkte Verbindung entsteht. Wer sich hindurchbewegt, könnte entlang einer so genannten geschlossenen zeitartigen Kurve in die Vergangenheit reisen.

logy begann 1983 mit der Untersuchung so genannter Wurmlöcher, die eine Art Tunnel zwischen verschiedenen Regionen der Raumzeit darstellen und so Reisen in die Vergangenheit erlauben könnten. »Verbindet man in der allgemeinen Relativitätstheorie zwei verschiedene Regionen des Raums, so verknüpft man zugleich zwei verschiedene Regionen der Zeit«, erläutert Sean Carroll, ein Kollege von Thorne.

Der Eingang eines Wurmlochs wäre kugelförmig – ein dreidimensionaler Eingang in einen vierdimensionalen Tunnel. Wie bei allen geschlossenen zeitartigen Kurven wäre auch die Reise durch ein Wurmloch unspektakulär, so Carroll. »Man löst sich nicht auf und wird dann zu einem anderen Zeitpunkt wieder zusammengesetzt. Solche Visionen aus der Sciencefiction sind in keiner anerkannten Theorie möglich.«

Zwar können Physiker Gleichungen formulieren, die Wurmlöcher und weitere geschlossene zeitartige Kurven beschreiben, doch alle Modelle bieten ernsthafte Fallstricke. Um überhaupt ein Wurmloch zu erzeugen, benötigt man negative Energie. Ohne diese würden der sphärische Eingang und der vierdimensionale Tunnel sofort implodieren. Eine solche Struktur wäre praktisch kaum stabil oder vielleicht sogar grundsätzlich unmöglich, sagt Carroll: »Negative Energie bereitet in der Physik eine Menge Probleme.«

Aber selbst wenn sich ein Wurmloch offen halten ließe, kämen die nächsten Schwierigkeiten. Teilchen, die sich hindurchbewegen, würden diesen Weg schleifenartig immer wieder durchlaufen. Dabei wächst ihre Energie über alle Grenzen. Und da Energie ebenso wie Masse die Raumzeit deformiert, kollabiert das Wurmloch zu einem Schwarzen Loch. »Wir sind zwar nicht 100-prozentig sicher, dass das passiert«, räumt Carroll ein, »aber es scheint eine vernünftige Annahme zu sein, dass das Universum den Bau einer Zeitmaschine dadurch verhindert, dass es diese in ein Schwarzes Loch verwandelt.«

Im Gegensatz zu Schwarzen Löchern, die eine natürliche Folge der allgemeinen Relativitätstheorie sind, handelt es sich bei Wurmlöchern und geschlossenen zeitartigen Kurven um künstliche Konstrukte, um die Grenzen der Theorie auszuloten.

Selbst wenn Wurmlöcher physikalisch nicht plausibel sind – wichtig ist, dass sie nicht der allgemeinen

Relativitätstheorie widersprechen. »Es ist seltsam, dass wir so nahe daran sind, die Möglichkeit von Zeitreisen auszuschließen und es doch nicht wirklich schaffen. Ich finde das schon ärgerlich«, sagt Carroll, entnervt davon, dass eine so elegante Theorie wie die von Einstein etwas so offensichtlich Unglaubliches erlaubt. Doch das Nachdenken darüber führt die Physiker auch zu einem besseren Verständnis unserer Naturgesetze. Möglicherweise hätte unser Universum gar nicht erst entstehen können, wenn ein Weg rückwärts in der Zeit grundsätzlich verboten wäre.

Die allgemeine Relativitätstheorie beschreibt das Universum auf seinen größten Skalen. Die Quantenmechanik dagegen ist eine Art Handbuch für atomare Größenordnungen und bietet eine Spielwiese für besonders überraschende Phänomene mit geschlossenen zeitartigen Kurven. Die Erscheinungen können sogar den Ursprung des Kosmos betreffen.

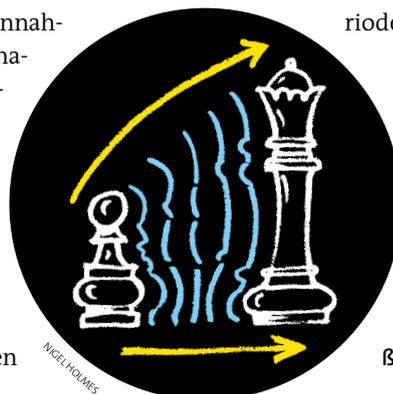
Bei sehr kleinen Längen von etwa 10^{-30} Zentimetern erwarten Forscher wie John Friedman von der University of Wisconsin-Milwaukee, dass die Topologie der Raumzeit regelrecht brodeln. Und solche zufälligen Fluktuationen könnten auch zu geschlossenen zeitartigen Kurven führen, wenn nichts Grundlegendes es verhindert. Lassen sich derartige Fluktuationen vergrößern, um eine Zeitmaschine zu bauen? »Es gibt keinen formalen Beweis dafür, dass makroskopische geschlossene zeitartige Kurven komplett unmöglich sind«, antwortet Friedman. »Aber die meisten Forscher, die sich mit diesen allgemeinen Fragen auseinandergesetzt haben, würden wohl dagegen wetten.«

Ein Kosmos, der sich selbst erschafft

Eine Schleife in der Raumzeit zu erzeugen, ob auf der Quantenebene oder im kosmischen Maßstab, erfordert zweifellos extreme physikalische Bedingungen. Und der wahrscheinlichste Ort und Zeitpunkt, an dem solche extremen Umstände geherrscht haben könnten, ist die Geburt des Universums.

In einer 1998 veröffentlichten Arbeit vertraten Gott und Li-Xin Li, ein jetzt an der Universität Peking tätiger Astrophysiker, die Ansicht, geschlossene zeitartige Kurven seien nicht nur möglich, sondern notwendig, wenn man die Geburt des Kosmos erklären will. »Wir untersuchten die Frage, ob eine Zeitschleife am Anfang des Universums dem All erlauben könnte, sich selbst zu erschaffen«, erklärt Gott.

Das Universum von Gott und Li enthält, wie auch das Standardmodell der Kosmologie, eine Periode der Inflation: Ein alles durch-



Beim Schachspiel ist es in einer seltenen Situation erlaubt, einen Bauern in eine Dame zu verwandeln. Analog müssen Physiker die Extrembedingungen des Kosmos beobachten, um dessen Regelwerk abschließend zu verstehen.

dringendes Energiefeld treibt die anfänglich rasante Expansion des Kosmos an. Viele Kosmologen denken, dass der Prozess unzählige unterschiedliche Universen neben unserem eigenen hervorbringt. »Es ist schwierig, die Inflation anzuhalten, wenn sie erst einmal angefangen hat«, erläutert Gott, »eher erhalten wir eine sich ewig verzweigende Struktur. Einer dieser Äste ist unser Universum. Doch wir müssen uns fragen, wie der Stamm dieses Baums entsteht. Wir vermuteten, einer der Zweige könnte eine Schleife bilden und zu dem Stamm werden.« Eine einfache zweidimensionale Darstellung dieses selbststartenden Kosmos von Gott und Li ähnelt der Zahl 6, wobei die Raumzeitschleife unten und unser Universum oben ist. Die Inflation erlaubte dem Universum, so argumentieren die beiden Forscher, auszubrechen und sich zu unserem Kosmos zu entwickeln.

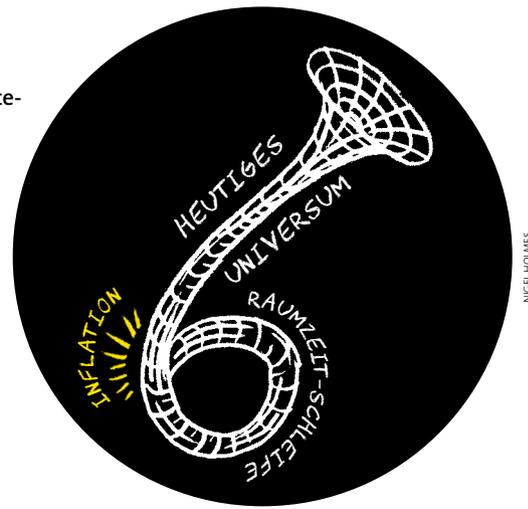
Es ist zwar schwer, sich dieses komplexe Modell vorzustellen, aber Gott sieht einen entscheidenden Vorteil darin, dass es die Notwendigkeit eliminiert, das Universum aus dem Nichts zu erschaffen. Andererseits haben beispielsweise Alexander Vilenkin von der Tufts University, Stephen Hawking von der University of Cambridge und James Hartle von der University of California in Santa Barbara durchaus Modelle entworfen, in denen das Universum aus dem Nichts entsteht. Gemäß den Gesetzen der Quantenmechanik ist der scheinbar leere Raum von virtuellen Teilchen erfüllt, die spontan entstehen und sich wieder vernichten. Hawking und seine Kollegen denken, das Universum könnte auf die gleiche Weise aus einer Quantenfluktuation entstanden sein.

Derzeit haben wir keine Möglichkeit zu überprüfen, ob eine dieser Theorien korrekt ist. Der berühmte Physiker Richard Feynman verglich das Universum mit einer von Göttern gespielten Schachpartie. Die Wissenschaftler beobachteten es und versuchen, die Regeln zu verstehen. Sie sehen etwa, wie Bauern immer nur ein Feld vorwärtsziehen. Wenn die Forscher niemals die Eröffnung eines Spiels beobachten, wissen sie nicht, dass sich die Figuren dann zwei Felder weit bewegen können. Und wenn sie Zeuge werden, wie ein Bauer in eine Königin umgewandelt wird, würden sie auch das für einen Verstoß gegen die Regeln halten, obwohl so ein Zug möglich ist. Nur hat ihn niemand zuvor beobachtet.

Die Erforschung von Zeitreisen ist in einer ähnlichen Situation. Wir untersuchen die Grenzen der physikalischen Gesetze, indem wir außergewöhnliche Umstände betrachten. Reisen in die Vergangenheit sind nicht verboten, sie treten nur in dem uns vertrauten Universum nicht auf. Die Verwandlung eines Bauern in eine Königin könnte zu den Regeln der Relativitätstheorie gehören und damit für die Frage wichtig sein, wie das Universum entstanden ist.

Solche spekulativen Ideen scheinen eher philosophischer als physikalischer Natur zu sein. Doch im Augenblick sind Quantenmechanik und allgemeine Relativitätstheorie – zwei mächtige, aber der Alltagserfahrung widersprechende Theorien – alles, was wir haben, um unser All zu beschreiben. Die Wissenschaftler besitzen keine klare Vorstellung, was passiert, wenn sie versuchen, Quantenmechanik und Relativi-

Eine Theorie zur Entstehung des Kosmos besagt, dass er aus sich selbst hervorgegangen ist und somit keinen Anfang hat. Eine Inflationsphase löste den Teil aus der ewigen Raumzeit-Schleife heraus, welchen wir als unser Universum kennen.



tätstheorie zusammenzubringen. Es liefert nicht immer schlüssige Ergebnisse, stückchenweise die Mathematik aus beiden Welten miteinander zu vermischen. Aber die Theoretiker können kaum etwas anderes tun, denn sie wissen nicht, wie sie sonst auf sinnvolle Weise vorankommen könnten.

Wird eine zukünftige Theorie die Möglichkeit von Reisen in die Vergangenheit ein für alle Mal beseitigen? Oder wird sich einmal mehr zeigen, dass das Universum noch seltsamer ist, als wir es uns vorstellen können? Die Physik hat seit Einsteins Neudefinition von Zeit und Raum gewaltige Fortschritte gemacht. Zeitreisen, für Wells reine Fiktion, sind inzwischen eine bewiesene Realität, jedenfalls in eine Richtung. Ist es wirklich unmöglich, sich eine kosmische Symmetrie vorzustellen, die es uns erlaubt, sowohl im Raum als auch der Zeit in alle Richtungen zu steuern? Auf diese Frage antwortete Gott mit einer Anekdote.

Einstein unterhielt sich einmal mit einem Kollegen. Dieser zückte plötzlich ein Notizbuch. »Was ist das?«, fragte Einstein. »Ein Notizbuch«, antwortete der andere, »in das ich sofort jeden wichtigen Gedanken schreibe.« Darauf Einstein: »Ich habe nie eines gebraucht. Ich hatte in meinem ganzen Leben nur drei gute Ideen.« Und die Moral der Geschichte? »Ich denke«, schloss Gott, »wir warten auf einen neuen guten Einfall.«

DER AUTOR



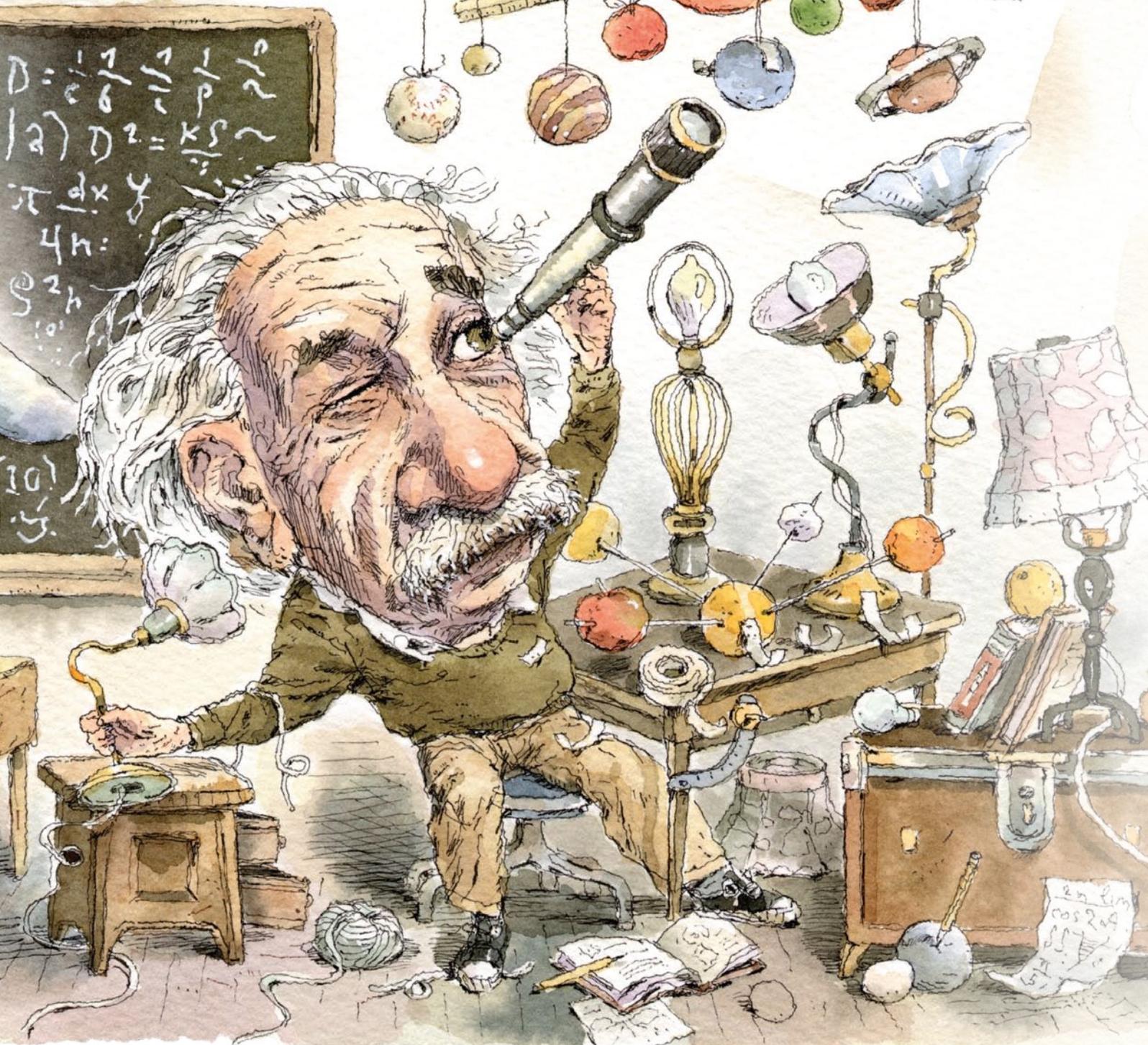
Tim Folger ist Wissenschaftsjournalist und lebt in New Mexico, USA.

LITERATURTIPP

Müller, A.: Zeitreisen und Zeitmaschinen, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg 2016
Naturwissenschaftliche und historische Zusammenhänge sowie – manchmal augenzwinkernde – Zukunftsvisionen

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372447

Mit zahlreichen mathematischen Werkzeugen und viel Improvisationstalent konstruierte Einstein eine neue Theorie der Gravitation. Was ihre Konsequenzen angeht, schien er aber manchmal den Überblick zu verlieren.



JOHN CUNEO

WISSENSCHAFTLICHES DENKEN

Hier irrte Einstein

Jeder macht Fehler. Aber die des legendären Physikers sind besonders aufschlussreich.

Von Lawrence M. Krauss

Wie alle Menschen beging Albert Einstein Fehler – und wie viele Physiker publizierte er diese mitunter sogar. Während wir unsere Missgeschicke lieber schnell vergessen wollen, lohnt es sich in Einsteins Fall, genauer hinzusehen. Denn seine Irrtümer beleuchten die Entwicklung seiner Denkweise und die Veränderungen in den wissenschaftlichen Auffassungen über das Universum. Sie offenbaren die Herausforderungen, die mit Entdeckungen an der vordersten Front der Forschung verbunden sind. Wer die Grenzen des Naturverständnisses verschiebt, kann nicht wissen, ob die zu Papier gebrachte Idee realen Phänomenen entspricht, ob sie zu tief greifenden Einsichten führt – oder schlicht im Sand verläuft.

Der Mann, der die Bedeutung von Raum und Zeit neu definierte, hat überraschend oft die Tragweite seiner Entdeckungen unterschätzt oder gar angezweifelt. Einige heute erst aufblühende Forschungszweige der Kosmologie basieren auf drei Gedanken, die Einstein falsch beurteilte: Gravitationslinsen, Gravitationswellen und die beschleunigte Expansion des Kosmos.

Im Fall des heute Gravitationslinseneffekt genannten Phänomens war Einsteins entscheidender Fehler, die Bedeutung seiner berühmten Entdeckung herunterzuspielen, dass Schwerefelder Lichtstrahlen ablenken. Im Dezember 1936 veröffentlichte er unter der Überschrift »Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field« (»Die linsenartige Wirkung eines Sterns durch die Ablenkung von Licht im Gravitationsfeld«) einen kurzen Artikel im Fachblatt »Science«. Der Text beginnt auf eine treuherzige Weise, die in der modernen akademischen Literatur kaum mehr vorstellbar ist. Einstein berichtet von einem Austausch mit dem tschechischen Ingenieur Rudi Mandl: »Vor einiger Zeit stattete mir R. W. Mandl einen Besuch ab und forderte mich auf, die Ergebnisse einer kleinen Berechnung zu veröffentlichen, die ich auf seine Bitte durchgeführt hatte. Mit dieser Notiz erfülle ich seinen Wunsch.«

Die »kleine Berechnung« untersuchte die Möglichkeit extremer Lichtablenkungen durch die Schwerkraft. Einstein zeigte, dass ein ausreichend massereicher Körper das Licht eines weit dahinterliegenden Himmelsobjekts stark genug verzerren könnte, um ein verstärktes oder mehrfaches Bild der fernen Quelle zu erzeugen. Die verbogene Raumzeit

kann also ähnlich wie eine Linse wirken. Gravitationslinsen sind inzwischen ein wichtiges Werkzeug der Kosmologie. Sie ermöglichen es, sehr ferne Galaxien abzubilden oder auch bei ansonsten unsichtbarer Materie allein durch deren Schwerkraftwirkung Rückschlüsse darauf zu ziehen, wie sie im Universum verteilt ist.

Doch Einstein erkannte damals weder die Größe noch die Bedeutung des Effekts. Stattdessen gelangte er in seinem Artikel von 1936 zu der Schlussfolgerung, die Aufspaltung der Bilder durch einen nahen Stern sei so klein, dass sie nicht beobachtbar wäre. Das erklärt sicher auch die Bescheidenheit am Anfang des Textes. Sein Ergebnis ist zwar technisch korrekt, aber offenbar entging es Einstein, dass Sterne nicht die einzigen Objekte sind, die als Gravitationslinsen wirken können.

Licht auf gewundenen Pfaden

Dieser Fehler überrascht umso mehr, da der Gravitationslinseneffekt einen gewaltigen Einfluss auf Einsteins wissenschaftliche Reputation hatte. Die Ablenkung von Licht durch eine Masse ist eine der zentralen Voraussagen der allgemeinen Relativitätstheorie. Im Jahr 1919 beobachtete eine von Arthur Stanley Eddington geleitete Expedition eine totale Sonnenfinsternis. Neben der verdunkelten Sonne konnten die Astronomen Sterne beobachten und ermitteln, dass ihr Licht von unserem Zentralgestirn in der Tat so abgelenkt wird, wie nach Einsteins Gleichungen zu erwarten war. Überall auf der Welt berichteten Zeitungen auf ihren Titelseiten über die britische Expedition, die unmittelbar nach dem Ende des Ersten Weltkriegs die Vorhersage eines Deutschen bestätigte. Einstein wurde rasch zu einer gesellschaftlichen Ikone wie seither wohl kein anderer Physiker.

Und die Geschichte enthält noch eine weitere Wendung. Einstein hatte bereits 1912 die Lichtablenkung berechnet. Schon damals erkannte er die kosmologische Bedeutung des Ergebnisses nicht. Schlimmer noch, ihm unterlief ein beinahe folgenschwerer mathematischer Fehler: Er verwendete eine frühe Version der allgemeinen Relativitätstheorie, die eine halb so große Lichtablenkung vorhersagte. Und für die Sonnenfinsternis 1914 war bereits eine Expedition geplant, um das zu überprüfen. Dann brach der Erste Weltkrieg aus, und es kam nicht mehr zu diesen Beobachtungen. Wären die

Messungen gelungen, hätten die Daten im Widerspruch zur Vorhersage der neuen Theorie gestanden – mit unabsehbaren Konsequenzen für Einsteins Werk.

Nachdem sein Artikel 1936 erschienen war, schrieb Einstein dem »Science«-Redakteur in geradezu rührend demütiger Fehleinschätzung seiner Arbeit: »Ich möchte Ihnen auch für Ihre Kooperation bei meiner kleinen Veröffentlichung danken, die Herr Mandl aus mir herausgequetscht hat. Sie ist nur von geringem Wert, aber sie bereitet dem armen Kerl eine Freude.«

Einstein hatte offenbar übersehen, dass Sterne Galaxien bilden. Der in die USA emigrierte Schweizer Astronom Fritz Zwicky vom California Institute of Technology führte dies bereits wenige Monate nach Einsteins Veröffentlichung im Fachblatt »Physical Review« aus. Einzelne Sterne mögen einen unbeobachtbaren Effekt produzieren, aber große Galaxien mit möglicherweise Milliarden Sternenmassen führen zu einem messbaren Phänomen.

Zwicky's Arbeit von 1937 ist bemerkenswert. Er schlug drei mögliche Anwendungen vor, die nahezu alles vorwegnahmen, was Astronomen erst in den nachfolgenden Jahrzehnten entwickelten: die allgemeine Relativitätstheorie zu testen, das Licht ansonsten unsichtbarer Objekte hinreichend zu verstärken und die Massen der größten Strukturen im Kosmos zu messen. Eine vierte, ebenso bedeutsame Anwendung übersah Zwicky: die Bestimmung der Geometrie und Entwicklung des Kosmos auf den größten Skalen.

Wenn die Raumzeit schwingt

Im Fall der Gravitationswellen dagegen war Einstein zwar von Anfang an klar, dass sich diese Schwingungen von Raum und Zeit aus seiner Theorie ergeben. Trotzdem wich er für eine Weile von seiner ursprünglichen, korrekten Behauptung ab, dass es sie gibt. Heute verspricht der bald erwartete Nachweis dieser Wellen, die etwa von kollidierenden Schwarzen Löchern oder aus der Ära der kosmischen Inflation stammen, schon bald ein neues Fenster in den Kosmos zu öffnen (siehe »Warten auf die Welle«, SdW 12/2015, S. 46).

Einstein sagte die Existenz von Gravitationswellen 1916 voraus, kurz nach Fertigstellung seiner allgemeinen Relativitätstheorie. Zwar ist die Mathematik dieser Wellen komplex, aber Einsteins Argumentation gut nachvollziehbar. Gemäß den Gesetzen des Elektromagnetismus erzeugt die Bewegung einer elektrischen Ladung eine oszillierende Störung, die sich als elektromagnetische Welle manifestiert. Da laut Einstein Materie den Raum krümmt, sollte die Bewegung einer Masse ganz analog die Raumzeit beeinflussen. Doch dann kamen ihm Zweifel, ob solche Effekte physikalisch real sein könnten.

Einstein verkündete seinen Meinungswandel 1936 in einem Artikel in »Physical Review«, also jenem Fachjournal, das auch Zwicky's Interpretation von Galaxien als Gravitationslinsen publizierte. Die Geschichte, wie es zu Einsteins Irrtum kam und wie er seinen Fehler schließlich erkannte, ist geradezu abstrus. Drei Jahre zuvor war er von Deutschland in

AUF EINEN BLICK

BRILLANTE BOCKSCHÜSSE

1 Trotz seines Genies unterschätzte Albert Einstein einige der **Konsequenzen seiner eigenen Theorie**.

2 Die Bedeutung von **Gravitationslinseneffekten** entging ihm ebenso wie diejenige von **Gravitationswellen**. Auch die **beschleunigte Expansion des Kosmos** war in seinen Gleichungen bereits angelegt.

3 Einsteins Fehlannahmen zu untersuchen, gibt nicht nur Einblick in seine Art zu denken, sondern eröffnet eine neue Perspektive auf die **Erfolge der modernen Kosmologie**.

die USA ausgewandert und offensichtlich immer noch nicht daran gewöhnt, wie einige Dinge in den Fachkreisen der neuen Welt gehandhabt wurden. Zu dieser Zeit also schickte er den Aufsatz mit dem Titel »Do Gravitational Waves Exist?« (»Existieren Gravitationswellen?«) an die Zeitschrift. In einem Brief an seinen Kollegen Max Born erläuterte er: »Ich habe zusammen mit einem jungen Mitarbeiter das interessante Ergebnis gefunden, dass es keine Gravitationswellen gibt, trotzdem man dies gemäß der ersten Approximation für sicher hielt. Dies zeigt, dass die nichtlinearen allgemeinen relativistischen Feldgleichungen mehr aussagen, bzw. einschränken, als man bisher glaubte.«

Die Originalfassung des von Einstein gemeinsam mit seinem damaligen Forschungsassistenten Nathan Rosen verfassten Manuskripts existiert nicht mehr. Der Artikel wurde nie veröffentlicht. Dem heute weltweit üblichen Verfahren folgend, hatte der Herausgeber von »Physical Review« ihn anderen Forschern zur Begutachtung geschickt. Von einem der anonym bleibenden Gutachter kam ein kritischer Kommentar zurück, der umgehend mit der Bitte um Antwort an Einstein weitergeleitet wurde. Einstein zeigte sich fassungslos, dass sein Aufsatz weitergegeben wurde, denn so etwas war er von den deutschen Fachjournalen, in denen er zuvor publiziert hatte, nicht gewohnt.

So antwortete er dem Herausgeber hochmütig: »Wir haben Ihnen unser Manuskript zur Veröffentlichung gesendet und sie nicht ermächtigt, es vorher Spezialisten zu zeigen. Ich habe keine Veranlassung, die – ohnehin fehlerhaften – Kommentare Ihres anonymen Experten zu beantworten. Auf Grund dieses Vorfalls ziehe ich es vor, den Artikel woanders zu veröffentlichen.« Tatsächlich reichte er niemals wieder einen Artikel bei »Physical Review« ein. Und den Kommentar des Gutachters – es handelte sich um den angesehenen US-amerikanischen Kosmologen Howard Percy Robertson – hatte Einstein offenbar nicht gelesen. Er erläuterte völlig korrekt den von den Autoren begangenen Denkfehler.

Einstein und Rosen hatten versucht, eine Gleichung für ebene Gravitationswellen aufzustellen. Doch dabei stießen sie auf eine Singularität: Bestimmte Größen nahmen unendlich große Werte an. Aus diesem unsinnigen Resultat zogen sie den Schluss, dass Gravitationswellen nicht existieren. Ein-

stein verstand hier die Mathematik seiner eigenen Theorie falsch. Laut der allgemeinen Relativitätstheorie hängt die Natur nicht davon ab, wie die Koordinaten im Raum definiert sind. Viele bizarr erscheinende Lösungen der Gleichungen erweisen sich daher schlicht als Artefakte eines schlecht gewählten Koordinatensystems. So gibt es beispielsweise um ein Schwarzes Loch einen Radius, den Ereignishorizont, innerhalb dessen nichts mehr dem Schwarzen Loch entkommen kann. Stellt man nun Gleichungen für die Geometrie um ein Schwarzes Loch auf, so scheinen viele Größen – inklusive Längen und Zeitintervalle – am Ereignishorizont unendlich groß zu werden. Doch das ist nicht physikalisch. Verwendet man andere Koordinaten, die sich an der Bewegung von Licht durch den Raum orientieren, so verschwinden die Extremwerte. Ähnliches gilt für Gravitationswellen. Es gibt zwar kein Koordinatensystem, in dem sich ebene Gravitationswellen ohne scheinbare Singularitäten beschreiben lassen, doch sind diese nicht real. Verwendet man zwei verschiedene, sich überlappende Koordinatensysteme, so lässt sich das Problem lösen.

Immer noch von seiner Argumentation überzeugt, schickte Einstein seinen Artikel an das »Journal of the Franklin Institute«, doch bevor es dort erscheinen konnte, erkannte er seinen Fehler und zog die Arbeit zurück. Schließlich publizierte er eine revidierte Version unter der schlichten Überschrift »On Gravitational Waves«. Sie enthielt eine Lösung der Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie in einem Koordinatensystem, das für zylindrische statt für ebene Gravitationswellen geeignet ist und in dem keine Singularitäten auftreten, ganz wie Robertson es vorgeschlagen hatte.

Wie gelangte Einstein zur korrekten Lösung? Sein späterer Assistent Leopold Infeld berichtete, Robertson hätte ihn auf-

gesucht und ihm freundlich sowohl den Fehler im Originaltext als auch eine mögliche Lösung erläutert. Infeld wiederum informierte Einstein. Offenbar legte Robertson nicht offen, dass er der Gutachter war, und auch Einstein erwähnte den ursprünglichen Kommentar zu keiner Zeit. Das Ergebnis all dieser Wirrungen war, dass Einstein seine fehlerhafte Behauptung, Gravitationswellen würden nicht existieren, nie veröffentlicht hat – dank der Intervention eines besonders gewissenhaften Kollegen.

Ein dynamisches Universum voller Singularitäten – schrecklich!

Im Hinblick auf Schwarze Löcher hatte Einstein kein solches Glück. Ihn verwirrte die Singularität am Ereignishorizont und er nahm an, die Natur müsste sie auf irgendeine Weise unterbinden. Er ging davon aus, dass die Erhaltung des Drehimpulses die Teilchen in einem kollabierenden Objekt auf stabile Umlaufbahnen mit einem endlichen Radius zwingen sollte, was die Bildung eines Ereignishorizonts verhindern würde. Dass Schwarze Löcher wirklich physikalische Objekte sein könnten, erkannte er nie an.

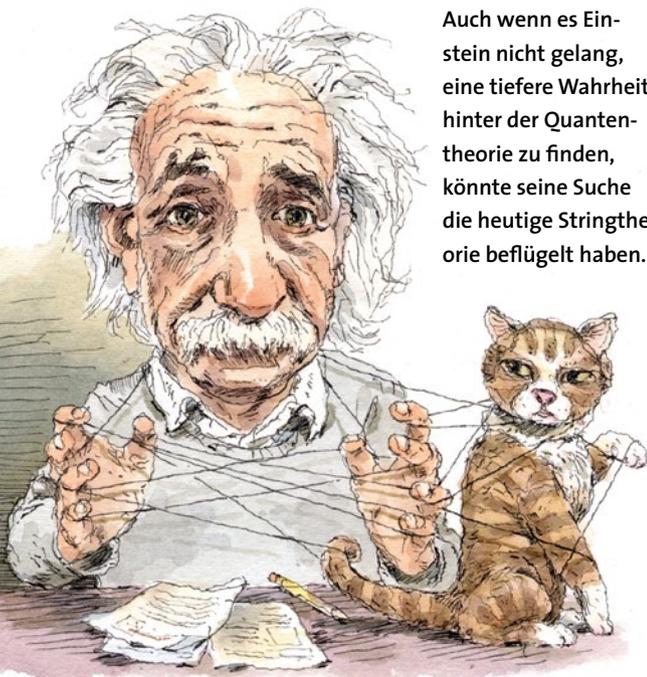
Der vielleicht bekannteste Fehler Einsteins ist seine Modifikation der allgemeinen Relativitätstheorie, mit der er ein statisches Universum möglich machen wollte. Angeblich hat Einstein seinen Irrtum sogar selbst als »Eselei« bezeichnet. Als er 1915 die allgemeine Relativitätstheorie fertig stellte, war die vorherrschende Ansicht, unsere Milchstraße sei von einem unendlich großen, unveränderlichen und ewig wählenden Kosmos umgeben. Doch wie Einstein bemerkte, wirkt die von der Materie erzeugte Schwerkraft stets anziehend, und das macht eine statische Lösung unmöglich. Die Gravitation sollte zu einem Kollaps der Materie führen.

In dem 1917 veröffentlichten Artikel »Cosmological Considerations in the General Theory of Relativity« (»Kosmologische Betrachtungen in der allgemeinen Relativitätstheorie«) führte Einstein deshalb einen zusätzlichen konstanten Term in seine Gleichungen ein, um so zu einer statischen Lösung zu kommen (siehe »Genial verfehlt«, S. 44). Diese »kosmologische Konstante« würde überall im Raum abstoßend wirken und so ein Gegengewicht zur Gravitation darstellen. Es gab keinerlei physikalische Rechtfertigung für diesen Term – einzig den Wunsch, einen Kollaps abzuwenden.

Doch in den folgenden Jahren mehrten sich die Anzeichen dafür, dass unser Universum keineswegs statisch ist. Zunächst leistete Einstein Widerstand. Der belgische Physiker und Priester Georges Lemaître entwickelte 1927 ein Modell eines expandierenden Universums, das sogar bereits eine Art Urknall enthielt – zwei Jahre bevor Edwin Hubble seine bahnbrechenden Beobachtungen veröffentlichte, welche die Fluchtbewegung der Galaxien dokumentierten. Einstein kommentierte Lemaitres Arbeit vernichtend: »Ihre Berechnungen sind korrekt, aber Ihre Physik ist scheußlich.«

Doch schließlich sah Einstein seinen Fehler ein. Er besuchte auch Hubble, warf einen Blick durch dessen Teleskop am Mount Wilson Observatory und lobte schließlich 1933 Le-

Auch wenn es Einstein nicht gelang, eine tiefere Wahrheit hinter der Quantentheorie zu finden, könnte seine Suche die heutige Stringtheorie beflügeln haben.



JOHN CUNEO

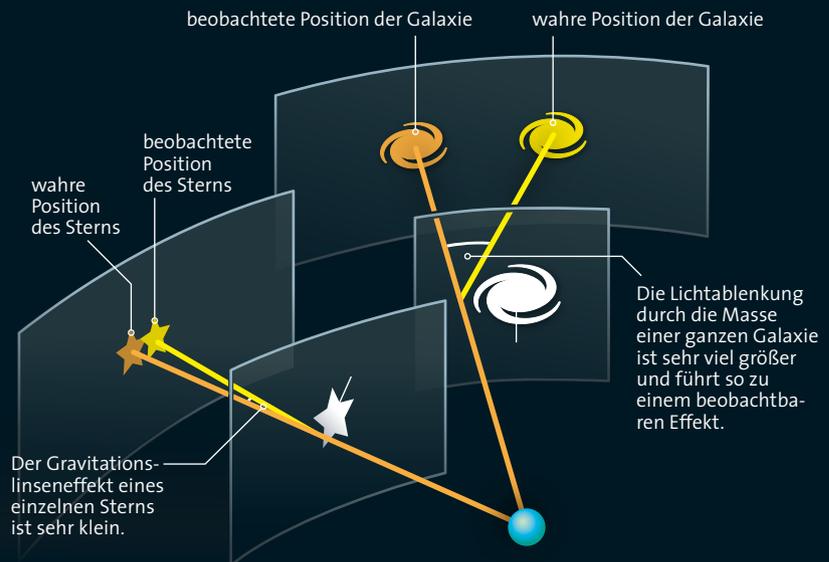
Genial verfehlt

In drei wichtigen Fällen hat Einstein entweder den Wert seiner Entdeckungen massiv unterschätzt oder eine korrekte Idee für falsch gehalten. Einige von ihm verworfene Gedanken sind für die moderne Kosmologie jedoch von entscheidender Bedeu-

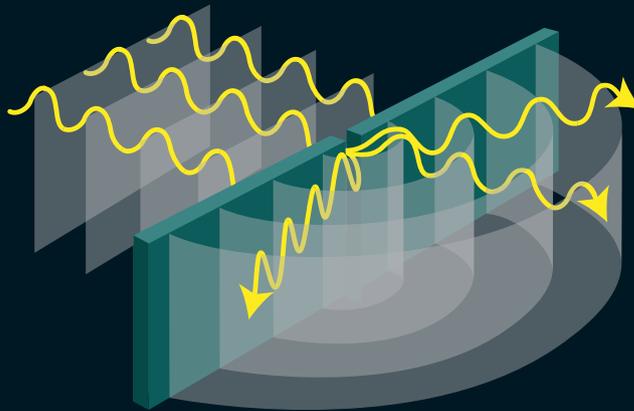
tung. Astronomen nutzen heute Gravitationslinsen, um Galaxienhaufen zu kartieren, Gravitationswellen könnten einen Blick in die ersten Augenblicke nach dem Urknall erlauben, und die kosmologische Konstante steuert die Evolution des Universums.

Gravitationslinsen

Als Einstein 1936 seine Arbeit über den »Gravitationslinseneffekt« publizierte, hielt er das Phänomen fälschlicherweise für nicht beobachtbar. Denn er dachte nur an Sterne, die mit ihrer Schwerkraft als Linsen für Licht fungieren können, jedoch nicht an den viel größeren Effekt ganzer Galaxien. Auch deshalb hatte er seine Berechnungen nicht schon viel eher veröffentlicht. Das allerdings war gut so, denn 1912 verwendete er eine frühe Version seiner Theorie und kam so zu einem falschen Ergebnis.



Gravitationswellen



Gravitationswelle, deren Schwingung an verschiedenen Teilen der Wellenfront in unterschiedlichen Richtungen zeigt

Aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgt die Existenz von Gravitationswellen, doch Einstein lehnte diese Voraussage zunächst ab. Auslöser dafür war ein mathematischer Fehler: Er hielt scheinbare Singularitäten in den Berechnungen für real. Doch diese unendlich großen Terme entstanden, weil er ein ungeeignetes Koordinatensystem verwendete und Wellen betrachtete, die nur in eine Richtung schwingen. Die Begutachtung seiner Arbeit verzögerte die Veröffentlichung und gab Einstein Zeit, zur korrekten Lösung mit Wellen zu gelangen, deren Schwingungsebene sich ändert.

Kosmologische Konstante

1917 fügte Einstein ad hoc einen zusätzlichen Term, die kosmologische Konstante, in seine Gleichungen ein, um ein statisches Universum zu ermöglichen. Kurz darauf entdeckten Astronomen jedoch, dass das Universum expandiert. Hätte Einstein seinen ursprünglichen Formeln getraut, so hätte er dies sogar vorher sagen können. Dass er die einmal eingeführte kosmologische Konstante wieder verwarf und ihre Implikationen nicht weiter untersuchte, war aus heutiger Sicht wiederum ein Fehler: In der modernen Kosmologie repräsentiert sie den Einfluss der Dunklen Energie.

Einsteins Feldgleichung

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

R und **g** beschreiben die Struktur der Raumzeit.

Die kosmologische Konstante **Λ** steht für einen Druck gegen die Anziehung im All.

G ist die Gravitationskonstante, **c** die Lichtgeschwindigkeit.

T repräsentiert die Energiedichte von Materie und Strahlung.

maîtres kosmologische Theorie als »schönste und befriedigendste Erklärung, die ich jemals gehört habe«.

Einstein war klar, dass es in einem expandierenden Universum keinen Bedarf mehr für die kosmologische Konstante gab. Bereits 1919 hatte er geschrieben, sie stehe »der formalen Schönheit der Theorie diametral entgegen«. In seiner posthum erschienenen Autobiografie erzählt der russische Physiker George Gamow: »Sehr viel später, als ich kosmologische Probleme mit Einstein diskutierte, bemerkte er, die Einführung des kosmologischen Terms sei die größte Eselei seines Lebens gewesen.«

Im Rückblick irrte sich Einstein gehörig mit seiner Annahme, die kosmologische Konstante sei wertlos. Heute bemühen Theoretiker sie wieder, um die geheimnisvolle Dunkle Energie zu beschreiben, die das All auseinandertreibt. Trotzdem war dieser Term unklug, und zwar aus zwei Gründen. Erstens hätte Einstein die Inkonsistenz der Relativitätstheorie mit einem statischen Universum begreifen können. Zu einer Zeit, in der niemand erwartet hätte, dass das Universum auf großen Skalen dynamisch ist, hätte er dessen Expansion vorhersagen können – statt sie später bloß widerwillig zu akzeptieren. Zweitens war die Einführung der kosmologischen Konstanten auch aus grundlegender Sicht eine Eselei. Sie erfüllte gar nicht den ihr zugeordneten Zweck, das gewünschte statische Universum zu erzeugen.

Der unerwartete Erfolg einer Eselei

Dieser Fehler entstand einerseits, weil Einstein für seine Berechnungen wiederum ein ungeeignetes Koordinatensystem verwendete und weil andererseits sein Konzept auch aus physikalischer Perspektive falsch war. Zwar ist es möglich, die Schwerkraft kurzzeitig durch die kosmologische Konstante auszugleichen, doch jede kleinste Störung würde das Universum aus dem Gleichgewicht bringen und entweder zu einer Ausdehnung oder zu einem Kollaps führen. Ob mit oder ohne kosmologische Konstante – das All muss dynamisch sein.

Der Term ist dennoch nützlich. Obwohl ursprünglich aus dem Stegreif in die Gleichungen eingefügt, lässt sich die Konstante heute auch aus der Perspektive der Quantenmechanik betrachten und als die Energie des leeren Raums interpretieren. Tatsächlich verlangt die Quantentheorie sogar das Vorhandensein eines solchen kosmologischen Terms. Mehr noch: Diese Energie ist nicht nur ein theoretisches Konzept. Wissenschaftler kamen 1998 auf der Basis von Messungen zu dem erstaunlichen Schluss, dass sich die Expansion des Kosmos beschleunigt, angetrieben durch etwas, das gerade so wie die kosmologische Konstante wirkt. Hier könnte man also sagen, dass Einstein doppelt irrte. Zunächst führte er aus den falschen Gründen die kosmologische Konstante ein, und dann verwarf er sie, statt ihre physikalischen Implikationen zu untersuchen.

Einsteins Fehler haben eine so bewegte und folgenreiche Geschichte, weil sie sich mit großen, provokativen Ideen darüber auseinandersetzten, wie Physik grundsätzlich funktio-

niert. Das gilt umso mehr für seine Ablehnung der Quantenmechanik als fundamentalem Naturgesetz.

Obwohl Einstein mit seiner Theorie des photoelektrischen Effekts – für die er den Nobelpreis erhielt – eine der Grundlagen für die Quantenmechanik entdeckte, legte er die Denkweise der klassischen Physik nie völlig ab. Die Vorstellung, der Aufenthaltsort eines Objekts sei nur eine Frage von Wahrscheinlichkeiten, oder dass ein Teilchen ein anderes über eine große Entfernung verzögerungsfrei beeinflussen könnte, erschienen ihm absurd – obwohl seine Ansichten über die Seltsamkeiten der Quantenmechanik viel nuancierter waren als gemeinhin beschrieben (siehe Artikel »Kosmische Würfelspiele«, SdW 11/2015, S. 54). Er widmete viele seiner späten Jahre dem Versuch, die Gleichungen der Gravitation und des Elektromagnetismus innerhalb eines klassischen Rahmens zu vereinigen.

Dabei faszinierten ihn auch die 1921 veröffentlichten spekulativen Ideen des deutschen Mathematikers und Physikers Theodor Kaluza, die später der schwedische Physiker Oskar Klein weiter ausarbeitete. Die beiden Forscher schlugen vor, dass das Universum nicht vier, sondern fünf Dimensionen besitzt und damit eine weitere, jedoch aufgerollte Raumdimension. Dann wäre eine einheitliche Beschreibung von Gravitation und Elektromagnetismus möglich. Für Einstein war diese Theorie unter anderem deshalb attraktiv, weil sie vollkommen klassisch war. Klein zeigte, dass innerhalb dieses Modells die Quantisierung der elektrischen Ladung eine Folge der geschlossenen Struktur der fünften Dimension ist.

Einsteins Versuch, eine einheitliche Feldtheorie zu konstruieren, scheiterte, aber seine fehlerhaften Ideen führten zu wichtigen Durchbrüchen. Indem er die Aufmerksamkeit auf die zusätzlichen Dimensionen von Kaluza und Klein lenkte, hat Einstein vielleicht die mehrdimensionale Mathematik der modernen Stringtheorie mit inspiriert. Sie ist einer der aktuell populären Ansätze, die allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik zu vereinen. Falls das eines Tages gelingt – auf welche Weise auch immer –, werden jedenfalls auch Einsteins Fehler ein Teil der Geschichte sein, die dorthin geführt hat. ~

DER AUTOR



Lawrence M. Krauss ist theoretischer Physiker, Autor mehrerer Bestseller und Direktor des interdisziplinären »Origins Project« an der Arizona State University, das sich mit den Ursprüngen des Kosmos und des Menschen befasst.

QUELLEN

Kennefick, D.: Einstein versus the Physical Review. In: Physics Today 58, S. 43–48, 2005

Renn, J. et al.: The Origin of Gravitational Lensing: A Postscript to Einstein's 1936 Science Paper. In: Science 275, S. 184–186, 1997

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372441

Wie sich Spinnennetze spannen

Einige seiner erstaunlichen Eigenschaften verdankt der Spinnenfaden einer Flüssigkeitshülle. Diese hält das Seidengeflecht in Form und macht es zugleich elastisch.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Das Verhältnis von Menschen zu Spinnweben ist zwiespältig. Einerseits erwecken die klebrigen Fäden Ekel, insbesondere wenn die veritablen Staubfänger in den Ecken eines Zimmers sichtbar werden oder sie sich bei Berührungen als ziemlich anhänglich erweisen. Andererseits sind wir immer wieder von der Ästhetik des perfekt gespannten Radnetzes beeindruckt, wenn es beispielsweise durch daran haftende Tautropfen eindrucksvoll in Erscheinung tritt oder im Sonnenlicht ein irisierendes Farbspiel entfaltet.

Aus zwei Gründen lassen sich Spinnfäden so schwer wieder entfernen: Sie sind klebrig und äußerst dehnbar. Wie Wissenschaftler herausgefunden haben, hängen beide Eigenschaften sogar eng miteinander zusammen. Forscher interessieren sich seit einigen Jahrzehnten für dieses Material und wollen den Mechanismus verstehen, der es so enorm elastisch und gleichzeitig stabil macht.

Eine Spinne baut ihr Netz mit einer Lösung (Spidroin-Sekret, eine Art Flüssigkristall), die sie aus ihrem Hinterleib herauszieht. Beim Kontakt mit der Luft verfestigt sich das Gemisch sofort zu einer äußerst festen Faser. Je nach Verwendungszweck kann die Spinne unterschiedliche Fäden produzieren. Für das Grundgerüst des Netzes verwenden viele Arten wie etwa die Kreuzspinne spezielle Radialfäden. Sie sind ziemlich steif und hängen sofort durch, wenn die Endpunkte auch nur um einige Prozent zusammengeschoben werden.

An das so errichtete Speichenrad fixiert die Spinne anschließend eine Spirale aus einem äußerst elastischen Fangfaden. Dieser ist selbst dann noch straff gespannt, wenn er sich bis auf fünf Prozent seiner eigentlichen Länge

zusammenzieht. Damit eignet er sich hervorragend, um Beute zu erwischen. Selbst Insekten, die mit hoher Geschwindigkeit auf das Netz treffen, deformieren es daher nur, statt es zu durchbrechen. Dass sie dabei nicht den Maschen entgleiten oder wie bei einem Trampolin in die entgegengesetzte Richtung wegkatapultiert werden, liegt an einer weiteren wichtigen Eigenschaft der Fangfäden. Sie sind mit winzigen wirkungsvollen Klebetröpfchen überzogen, an denen die Tiere unbarmherzig haften bleiben.

Diese Haftpunkte sind in ziemlich gleichmäßigen Abständen sorgfältig wie Perlen einer Kette aufgereiht. Dafür muss die Spinne sie jedoch nicht eigens mühsam auf dem Seidenfaden anordnen. Der Tröpfchenbesatz entsteht gewissermaßen durch reine physikalische Notwendigkeit. Zunächst zieht die

»Die Spinne näht' zur Nacht
im Dunkel sacht
an weißen Kreises Pracht.«

Emily Dickinson (1804–1882)

Spinne den Fangfaden wie zuvor den trockenen Radialfaden aus dem Hinterleib. Allerdings bedeckt sie ihn gleichmäßig mit einer zähflüssigen Lösung. Der Klebstoff besteht zu 80 Prozent aus Wasser; den Rest bilden Aminosäuren, Lipide und Salze. Solche Flüssigkeitszylinder sind jedoch nur stabil, wenn ihre Länge im Vergleich zum Umfang nicht zu groß ist. Werden sie weiter auseinandergezogen, schnüren kleinste Störungen die Schicht seitlich ein. Der Zylinder zerfällt dann unter dem Einfluss der Oberflächenspannung in ein System mehr oder weniger äquidistanter Tropfen. Diesen Prozess treibt das Bestreben der Natur an, so viel Energie wie möglich an die Umgebung abzugeben (2. Hauptsatz der Thermodynamik). Eine Kugelform minimiert die Grenzfläche zur Luft, und die überschüssige Oberflächenenergie wird frei.

Die Fäden in diesem Netz einer Kreuzspinne werden erst gut sichtbar,





Eine Honigschicht auf einem dünnen Nylonfaden zerfällt in einzelne Tropfen, ähnlich wie der Flüssigkeitsfilm auf einem Fangfaden.

H. JOACHIM SCHLICHTING

Die Kernfaser des Spinnfadens ist allerdings hydrophil, daher benetzt ein feiner Flüssigkeitsfilm sie weiterhin.

Mikroskopisch feine Perlenschnur

Dieser Zerfallsvorgang lässt sich mit einem einfachen Experiment nachstellen. Dazu taucht man den Zeigefinger in flüssigen Honig und zieht dann eine dünne Anglerschnur so zwischen Daumen und der benetzten Kuppe hindurch, dass der Nylonfaden möglichst gleichmäßig überzogen wird. Man kann jetzt am waagrecht gespannten Faden direkt beobachten, wie die Schicht in bestimmten Abständen einreißt und schließlich in eine Perlenkette aus Tropfen übergeht (Bild oben).

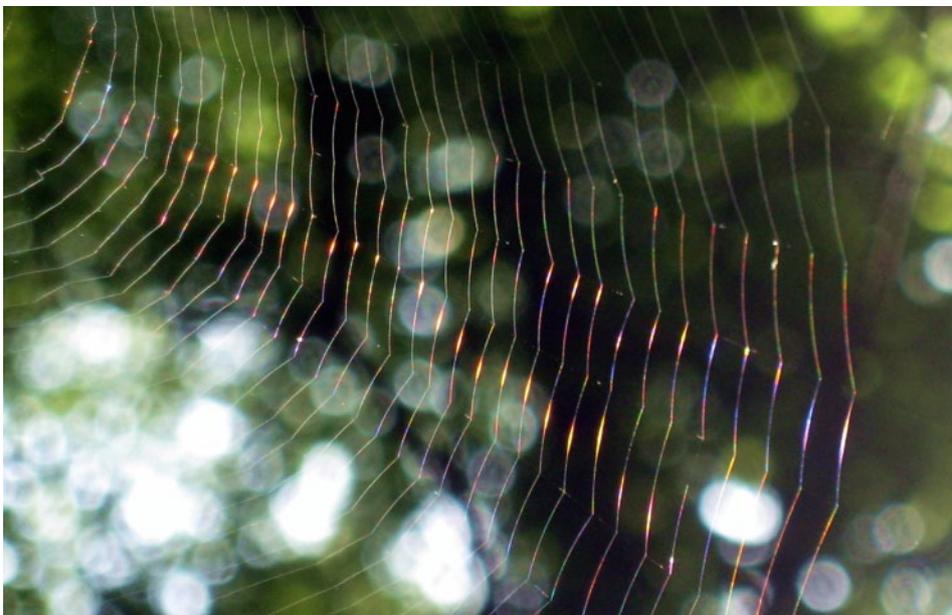
Doch hier endet auch schon der Vergleich mit dem Spinnfaden. Denn anders als bei der Schnur zieht sich die mikroskopisch feine Kernfaser infolge

starker Kräfte zusammen. Sie sind es, die sie letztlich so enorm elastisch machen, und entstehen, indem die Oberfläche der wässrigen Hülle minimiert wird. Das kann man sich an einem Beispiel klarmachen: Wenn sich zwei Speichen des Netzes annähern, lockert sich dadurch der Fangfaden dazwischen. Doch statt einfach durchzuhängen, bleibt dieser gespannt. Denn nun kann die Flüssigkeitshülle Oberflächenenergie an die Umgebung abgeben, indem der Zylinder sich entsprechend verkürzt und so die Grenzfläche zur Luft verkleinert. Das ist vor allem deshalb möglich, weil sich die äußerst flexible, hydrophile Kernfaser der neuen Länge anpasst, indem sie in den Tropfen ein verschlungenes Bündel bildet. Das könnte außerdem auf einem zusätzlichen Weg Energie freisetzen, da die Faser ohnehin die Tendenz hat, sich in

wässriger Umgebung zu einer energetisch günstigeren Knäuelform zusammenzuziehen. Weil sich bei der Verkürzung die Flüssigkeitstropfen vergrößern und vereinigen, bieten sie dafür auch immer genügend Platz. Der Faden leistet nun Widerstand gegen eine erneute Verlängerung. Denn dann muss mechanische Energie aufgewendet werden, um ihn zu dehnen und der nassen Schicht die frei gewordene Oberflächenenergie zurückzugeben.

Die Elastizität der Spinnenseide ist daher keine unmittelbare Eigenschaft des Materials, sondern liegt vor allem an der feuchten Hülle. Ausschlaggebend ist übrigens nur das in der Klebflüssigkeit vorhandene Wasser – die weiteren Chemikalien spielen dabei keine Rolle. Forscher konnten zeigen, dass sich ein nasser Radialfaden wie ein Fangfaden verhält, und umgekehrt ein trockener Fangfaden an der Luft seine elastischen Eigenschaften verliert. ~

wenn sie mit Tau besetzt sind (links) oder im Licht der Sonne schillern (rechts).



H. JOACHIM SCHLICHTING

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.

QUELLE

Vollrath, F., Edmonds, D.T.: Modulation of the Mechanical Properties of Spider Silk by Coating with Water. In: Nature 340, S. 306–307, 1989

Dieser Artikel und Links im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1396784

Die Rettung des Riesentheorems

Vier alte Männer plagen sich, den längsten Beweis der Mathematik von 15 000 Seiten Umfang auf ein erträgliches Maß zu komprimieren – damit der Überblick über die Klassifikation der endlichen einfachen Gruppen nicht mit ihnen zu Grabe getragen wird.

Von Stephen Ornes

Die Tafeln quellen über von Köstlichkeiten an einem kühlen Freitagabend im September 2011. Judith L. Baxter und ihr Ehemann, der Mathematiker Stephen D. Smith, haben in ihrem Haus in Oak Parks (Illinois) reichlich aufgefahren: Kanapees, selbst gemachte Fleischbällchen, diverse Sorten Käse, gegrillte Shrimps auf Spießeln, Gebäck, Pasteten, Oliven, Lachs mit Dill und Feta im Auberginenmantel. Als Nachtisch stehen unter anderem ein Zitronen-Mascarpone-Kuchen und eine afrikanische Kürbistorte zur Auswahl. Die Sonne geht unter, und der Sekt fließt in Strömen, während die 60 Gäste, die Hälfte von ihnen Mathematiker, es sich gut gehen lassen.

Der Grund: Es gilt, ein großes Werk zu feiern. Vier der anwesenden Mathematiker – Smith, Michael Aschbacher, Richard Lyons und Ronald Solomon – haben soeben ein Buch veröffentlicht, das nicht weniger als 180 Jahre wissenschaftlicher Arbeit zum Abschluss bringen soll. Es geht um einen Überblick über die Lösung des größten Klassifikationsproblems in der Geschichte der Mathematik.

Das Werk ist nie auf einer Bestsellerliste gelandet – kein Wunder: Der Titel »Die Klassifikation der endlichen einfachen Gruppen« ist kaum geeignet, die Aufmerksamkeit des

breiten Publikums zu erregen. Für Algebraiker dagegen stellt der Band mit seinen 350 Seiten einen Meilenstein dar, denn er enthält die Kurzfassung dieser grandiosen Leistung. Die komplette Darstellung umfasst etwa 15 000 – nach anderen Schätzungen eher 10 000 – Seiten, verteilt über Hunderte von Zeitschriftenartikeln mit mehr als 100 Autoren. All diese Bemühungen gipfeln in einem mathematischen Satz mit dem treffenden Namen »Riesentheorem« (enormous theorem).

Wohlgemerkt: Der Satz selbst ist nicht besonders lang oder schwer zu verstehen (siehe »Vier Großfamilien«, S. 53) – aber mühsam zu beweisen. Es handelt sich um den längsten Beweis in der Geschichte der Mathematik.

Und nun schwebt dieses Meisterwerk in höchster Gefahr. Das Buch von 2011 skizziert den Beweis nämlich nur in groben Zügen, und das Vorhaben, ihn komplett aufzuschreiben, droht ob seiner schieren Größe menschenunmögliche Ausmaße anzunehmen. »Ich weiß nicht, ob irgendjemand tatsächlich alles gelesen hat«, sagt der 66-jährige Solomon, der sich mit dem Thema sein gesamtes Berufsleben lang befasst hat, bis er vor zwei Jahren an der Ohio State University in den Ruhestand ging. Solomon und seine drei Koautoren sind vermutlich die letzten noch lebenden Menschen, die den Beweis vollständig verstehen – und nicht mehr die Jüngsten. Smith ist 67, Aschbacher 71 und Lyons 70. »Wir möchten diese Gedanken unbedingt festhalten, bevor es zu spät ist und wir endgültig den Griffel weglegen«, sagt Smith.

Der Verlust wäre, nun ja, riesig. Das Riesentheorem ist so bedeutend, weil es Ordnung in die Gruppentheorie bringt – jene mathematische Disziplin, die sich mit Symmetrien befasst. Das Studium der Gruppen wiederum ist entscheidend für wissenschaftliche Gebiete wie die moderne Teilchenphysik. Deren Standardmodell – die grundlegende Theorie aller

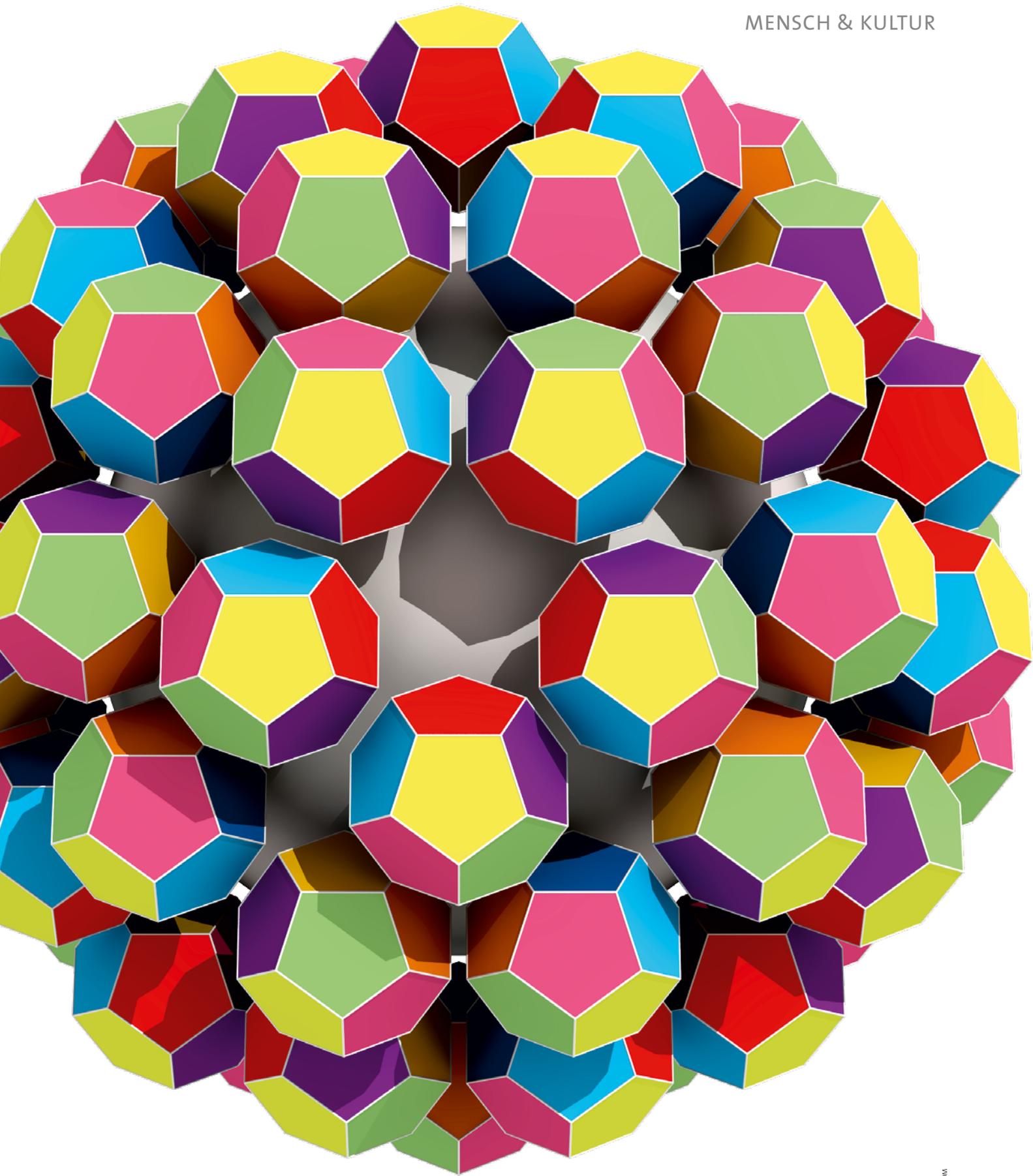
AUF EINEN BLICK

ENDLICHE EINFACHE GRUPPEN

1 Der umfangreichste Beweis der gesamten Mathematik ist der des **Riesentheorems**: Alle mathematischen Beschreibungen von Symmetrie lassen sich in vier Klassen einordnen.

2 Gegenwärtig besteht er aus einer großen Zahl von Einzelarbeiten, die über geschätzte **15 000 Druckseiten** verteilt sind.

3 Die wenigen Menschen, die den Beweis noch überblicken, fürchten, dass ihr Wissen mit ihnen untergehen wird. Einige von ihnen haben ein **Rettungsprojekt** gestartet, mit dem der Beweis für die Nachwelt verfügbar gemacht werden soll.



Die Drehgruppe des Dodekaeders ist mit 60 Elementen die kleinste nichtkommutative endliche einfache Gruppe. Zur Verdeutlichung der Gruppenstruktur ist hier das Dodekaeder nicht um seinen eigenen Mittelpunkt gedreht dargestellt (dann würden alle gedrehten Exemplare in eins zusammenfallen), sondern um den Mittelpunkt der grauen Kugel.

Elementarteilchen, der nachgewiesenen wie der hypothetischen – beruht auf Methoden der Gruppentheorie. Symmetrieprinzipien, angewandt auf die Welt der Materiebausteine, verhalfen den Physikern dazu, so exotische Elementarteilchen wie die Quarks, aus denen sich die bekannteren Protonen und Neutronen zusammensetzen, zu postulieren und schließlich auch experimentell nachzuweisen.

Aus der Gruppentheorie bezogen die Physiker auch die verstörende Idee, dass selbst die Masse – die Trägheit all dessen, was wir sehen und anfassen können – entsteht, weil auf einem fundamentalen Niveau eine bestimmte Symmetrie zusammenbricht. Diese Vorstellung wies schließlich den Weg zur Entdeckung des Higgs-Bosons. Das prominenteste Elementarteilchen der letzten Jahre verdankt seine Existenz der Tatsache, dass auf der Quantenebene eine Symmetrie gestört ist. Bereits in den 1960er Jahren den Köpfen der Physiker mit Hilfe der Gruppentheorie entsprungen, musste es ein halbes Jahrhundert warten, bis es 2012 im Large Hadron Collider am CERN nahe Genf nachgewiesen wurde (Spektrum der Wissenschaft 12/2013, S. 19).

Ein Trümmerhaufen von Beweis

Symmetrie bedeutet: Etwas, ein materielles Objekt, eine geometrische Figur oder ein ganz abstrakter mathematischer Gegenstand, kann eine Reihe von Transformationen durchlaufen – Drehung, Verschiebung, Spiegelung, Bewegung durch die Zeit – und sieht am Ende dennoch genau aus wie zuvor. Der Sprachgebrauch der Wissenschaftler ist an dieser Stelle etwas gewöhnungsbedürftig: »Symmetrie« bezeichnet bei ihnen nicht nur – wie in der Umgangssprache – den Umstand, dass etwas unter einer Transformation unverändert bleibt, sondern auch diese Transformation selbst: »Die Drehung um einen beliebigen Winkel bezüglich des Mittelpunkts ist eine Symmetrie des Kreises.« Symmetrien finden sich überall im Universum, von den Beziehungen der Quarks untereinander bis hin zur Anordnung von Galaxien im All.

Eine Symmetrie kommt selten allein. Interessant sind vor allem solche Objekte, die mehrere verschiedenartige Symmetrietransformationen zulassen (siehe »Einmal hin, einmal her ...«, S. 51). So kann man einen Würfel um 90 Grad um seine vertikale Mittelachse drehen oder auch um seine Rechts-links-Achse, und er geht in beiden Fällen in sich selbst über. In diesem Fall bleibt das Objekt auch dann unverändert, wenn man mehrere Transformationen nacheinander auf es anwendet, im Beispiel den Würfel erst um die vertikale und dann um die horizontale Achse dreht. Aus zwei Symmetrien wird auf diese Weise eine dritte, die man die Komposition oder auch das Produkt der beiden ursprünglichen Symmetrien nennt. Und schon bekommt die Menge aller Symmetrien eines Objekts eine innere Struktur. Eine solche Menge nennen die Mathematiker eine Gruppe – und eine »endliche Gruppe«, wenn die Menge nicht unendlich viele Elemente hat.

In ihrem Bemühen um Abstraktion lösen die Gruppentheoretiker sich so weit wie möglich von dem Objekt, dessen Symmetrien ursprünglich den Anlass für diese Begriffsbil-

dung boten, und konzentrieren sich nur auf die innere Struktur. So gelten ihnen zwei Gruppen als im Wesentlichen gleich (»isomorph«), wenn sie dieselbe Struktur haben.

Unter diesem abstrakten Blickwinkel gewinnt die Gruppentheorie eine gewisse merkwürdige Ähnlichkeit mit der Zoologie oder auch der Chemie. Es gibt Verwandtschaften unter Gruppen, die einander auf den ersten Blick überhaupt nicht ähnlich sehen; man kann Gruppen zu neuen, größeren Gruppen zusammensetzen, und manche Gruppen sind in kleinere, elementarere zerlegbar, so wie mancher Stoff sich als Verbindung mehrerer chemischer Elemente herausstellt.

Das Riesentheorem ist in seiner Bedeutung dem Periodensystem der Elemente vergleichbar. Es sagt auf mathematisch präzise Weise aus, dass es vier Typen von endlichen Gruppen gibt, die jeweils bestimmte Merkmale gemeinsam haben, und dass sich jede endliche Gruppe aus Bausteinen dieser Typen zusammensetzen lässt. Diese elementaren Gruppen sind also so etwas wie die Atome der Theorie. Deswegen nennt man sie »einfach« und meint damit nicht etwa »müheles verständlich«, sondern nur »unzerlegbar«.

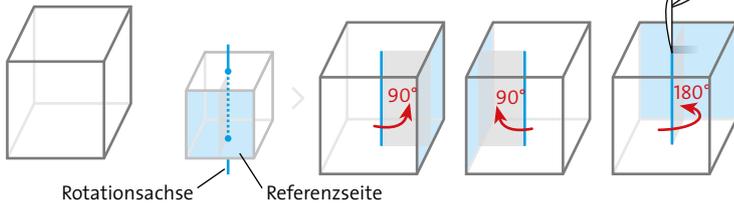
Ebenso wie das Periodensystem schafft das Riesentheorem mit einem Schlag Ordnung in einer unübersehbaren Vielfalt von Objekten. Es könnte eine ebenso mächtige erkenntnisleitende Rolle spielen – wenn sein Beweis nicht in einem so trostlosen Zustand wäre.

Die Gleichungen, Hilfssätze und Vermutungen, die zu dem Beweis beitragen, sind über mehr als 500 Zeitschriftenartikel verstreut. Für einige muss man dicke Bände in der Bibliothek wälzen – ein großer Teil der Arbeit stammt aus der Zeit vor dem Internet –, und alle sind voll von griechischen Buchstaben und den fachtypischen Sonderzeichen, deren jedes sehr viel sagt, aber erst dann, wenn man es richtig versteht. Zu allem Überfluss hat sich über die Jahrzehnte hinweg keine einheitliche Bezeichnungsweise etabliert, so dass man sich in den persönlichen Stil jedes Autors mühsam einlesen muss.

Zum Vergleich stelle man sich vor, die mehr als zwei Millionen Steine der großen Pyramide von Gizeh lägen irgendwie chaotisch in der Wüste herum, und nur wenige Menschen wüssten, welcher genau wohin gehört – mit der zusätzlichen Verschärfung, dass ein fehlender Stein das ganze Gebäude zum Einsturz bringen kann. Daher verspürt die Fachwelt dringenden Bedarf an einem leichter nachvollziehbaren Beweis des Riesentheorems. Denn ohne ihn steht die nächste Generation der Mathematiker vor einem qualvollen Dilemma: Sie müssten entweder diesem monströsen Beweis blind vertrauen oder gewissermaßen das Rad neu erfinden. Die erste Option wäre Verrat an den Grundprinzipien des Berufs und die zweite praktisch undurchführbar. »In gewisser Weise betrachten die meisten das Theorem schon heute als eine Art Black Box«, beklagt Solomon.

Die 2011 von Smith, Solomon, Aschbacher und Lyons fertig gestellte Kurzfassung ist Teil eines ehrgeizigen Plans mit dem Ziel, das gegenwärtige, verstreute Wissen für die nachfolgenden Generationen zu retten. Es geht darum, die dispa-

Einmal hin, einmal her, rundherum, das ist nicht schwer



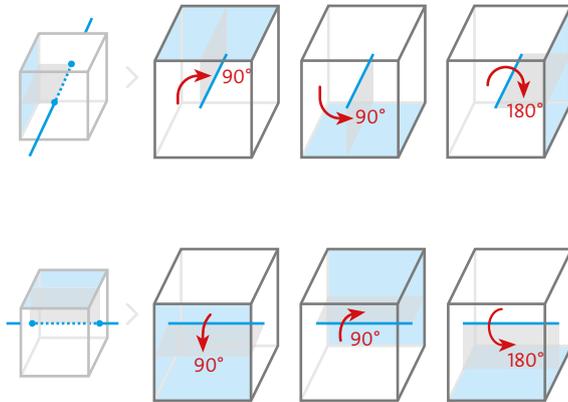
Für einen ersten Blick in die Gruppentheorie kann man einen Würfel drehen. Er hat sechs Seitenflächen; dreht man ihn um einen bestimmten Winkel um die Gerade, die die Mittelpunkte zweier gegenüberliegender Seiten verbindet, dann sieht er am Ende genauso aus wie vorher – vorausgesetzt, die Seiten sind nicht verschieden gefärbt (Bilder links).

Insgesamt gibt es genau 24 Drehungen (»Drehsymmetrien«), die den Würfel in sich überführen. Da es nicht unendlich viele sind, bilden sie eine endliche Gruppe.

Im Einzelnen unterscheidet man drei Sorten von Drehungen, gekennzeichnet durch ihre Drehachsen: Sie gehen durch zwei einander gegenüberliegende Flächenmittelpunkte (erste Serie), Kantenmittelpunkte (zweite Serie) oder Ecken (dritte Serie). Die erste Sorte Drehungen liefert $3 \cdot 3 = 9$ Symmetrien, die zweite 6 und die dritte $4 \cdot 2 = 8$, insgesamt also 23; dazu kommt die »Identität«, bei welcher der Würfel überhaupt nicht bewegt wird. Die Grafiken zeigen den Würfel vor der Drehung (kleine Würfel) und danach (große Würfel). Eingezeichnet ist jeweils die Drehachse zusammen mit einer gedachten Klappe zum Anfassen; zur Orientierung ist eine Seite des Würfels eingefärbt.

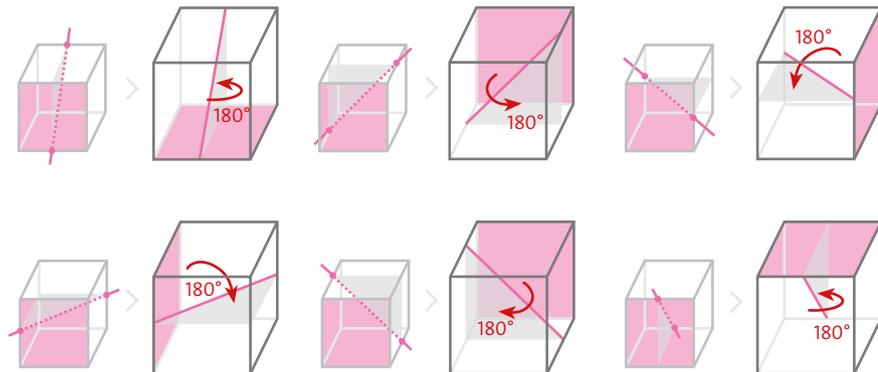
Seiten

Der Würfel hat drei Paare gegenüberliegender Seiten; jedes Paar ermöglicht drei Drehungen: um 90, 180 und 270 Grad.



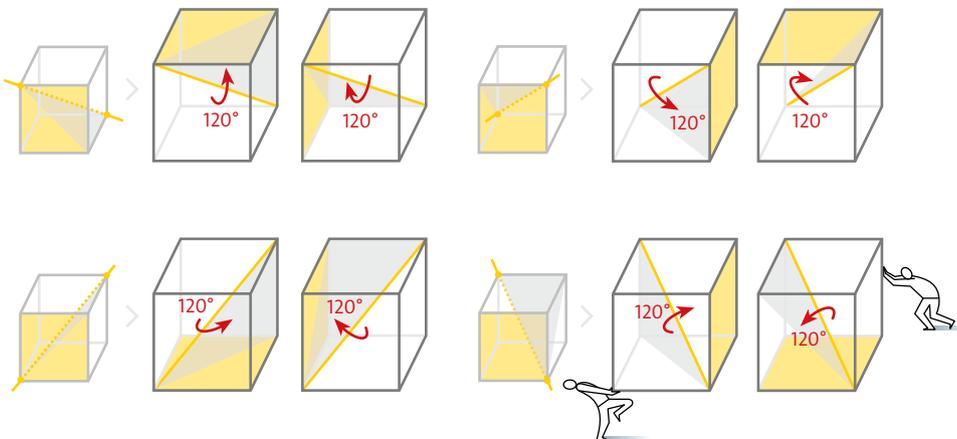
Kanten

Es gibt sechs Paare gegenüberliegender Kanten; zu jedem Paar gehört eine Drehung um 180 Grad (und keine weitere).



Ecken

Der Würfel hat vier Paare gegenüberliegender Ecken; um die Raumdiagonale, die ein solches Paar verbindet, kann man den Würfel um 120 Grad in die eine wie in die andere Richtung drehen. Das sind dieselben Symmetrien wie die eines gleichseitigen Dreiecks.



raten Teile des Beweises in eine logische Abfolge zu bringen. Vor mehr als 30 Jahren gefasst, ist der Plan bis heute nur etwa zur Hälfte ausgeführt.

Der prachtvolle Zoo der Gruppen

Das Bedürfnis nach Klassifikation ist alles andere als neu. Schon um 1890, als das Gebiet, das heute Gruppentheorie heißt, Gestalt annahm, suchten die Mathematiker nach Ordnung in der verwirrenden Vielfalt der neuen Strukturen.

In der Mathematik versteht man unter einer »Gruppe« eine Menge von Objekten, die sich durch eine mathematische Operation miteinander verknüpfen lassen, und zwar so, dass zwei Elemente, miteinander verknüpft, wieder ein Element der Gruppe ergeben. Darüber hinaus legen die Gruppentheoretiker Wert auf eine gewisse Vollständigkeit. So soll es in einer Gruppe stets ein »neutrales Element« geben, das mit jedem anderen Element verknüpft wieder dieses Element ergibt. Und jedes Element muss ein Gegenstück haben: das »inverse Element« mit der Eigenschaft, dass Stück und Gegenstück miteinander verknüpft das neutrale Element ergeben.

Ganz so abgehoben, wie es klingt, ist das Konzept nicht. Stellen wir uns unter den Elementen gewöhnliche ganze Zahlen vor und unter der Verknüpfung ein biederes Pluszeichen, so stellt sich heraus, dass wir bereits in der Grundschule elementare Gruppentheorie betrieben haben. Das neutrale Element ist die Null; nur auf die Inversen – die negativen Zahlen – mussten wir noch ein paar Jahre warten. Auch die reellen Zahlen mit Ausnahme der Null bilden eine Gruppe mit der Multiplikation als Verknüpfung.

Sieht man von diesen landläufigen Gruppen ab, die bei den Fachleuten eher als Langweiler gelten, so besteht eine Gruppe typischerweise aus Symmetrietransformationen. Zwei von ihnen verknüpft man, indem man sie nacheinander anwendet: Dreht man einen Würfel erst um 90 Grad um seine vertikale Achse und kippt ihn dann um 120 Grad über seine Raumdiagonale, so sieht er immer noch genauso aus wie zuvor; die beiden einzelnen Operationen haben sein Erscheinungsbild ja auch nicht verändert. Nichtstun ist eine Symmetrie (das neutrale Element der Gruppe), und zu jeder dieser Transformationen gibt es eine Umkehrung (das inverse Element), die deren Effekt gerade wieder aufhebt. Insgesamt gibt es 24 verschiedene Drehungen, die den Würfel unverändert lassen; sie bilden eine endliche Gruppe.

Unter den endlichen Gruppen sind die einfachen so etwas wie Atome. Sie bilden die grundlegenden Bausteine, aus denen sich größere und kompliziertere zusammensetzen lassen. So wie das Periodensystem die chemischen Elemente in Klassen mit ähnlichen Eigenschaften sortiert, ordnet das Riesentheorem jede einfache endliche Gruppe in eine von drei Familien ein – oder in die »Schmuddelecke« der bizarren Ausreißer, die offiziell »sporadische Gruppen« heißen. Deren größte, das »Monster«, enthält mehr als 10^{33} Elemente, und wenn man diese als Symmetrietransformationen interpretieren möchte, muss man sich in einen Raum der Dimension 196883 begeben. (Die Suche nach dem Monster in anderen

Gebieten der Mathematik oder der Naturwissenschaften hat mittlerweile einen eigenen Namen bekommen – Monstero-logie.)

Die ersten endlichen einfachen Gruppen hatten die Mathematiker bereits vor 1830 als solche erkannt. Um 1890 gewannen sie neue Einsichten, die zur Konstruktion weiterer Exemplare führten, und der Verdacht kam auf, dass sich diese Gruppen zu einer langen Liste ordnen lassen.

Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die Grundlage für das Riesentheorem gelegt, aber erst zirka 50 Jahre später waren die wesentlichen theoretischen Werkzeuge dafür beisammen. Den Zeitraum zwischen 1950 und 1980 nannte der Mathematiker Daniel Gorenstein von der Rutgers University den »Dreißigjährigen Krieg«. Die fähigsten Vertreter der Gruppentheorie trieben ihr Fach weiter voran als je zuvor. Sie schmiedeten Macheten in Form 200-seitiger wissenschaftlicher Arbeiten, schlugen sich damit durch den abstrakten Urwald und entdeckten immer wieder neue, noch exotischere Exemplare, so dass ein »prachtvoller Zoo« entstand, so Freeman Dyson vom Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey).

Es waren aufregende Zeiten. Richard Foote, damals Doktorand an der University of Cambridge und heute Professor an der University of Vermont, erinnert sich, wie er in einem muffigen Büro zwei Großmeistern bei der Arbeit zuschauen konnte. John Thompson, heute an der University of Florida, und John Conway, heute an der Princeton University, »schleuderten einander Blitze an den Kopf wie Titanen« auf der Suche nach den Eigenschaften einer besonders widerspenstigen Gruppe. »Ständig fielen ihnen für die Berechnungen absolut fantastische Techniken ein, und sie improvisierten permanent. Es war atemberaubend.«

Aus dieser heroischen Zeit sind zwei bedeutende Meilensteine zu vermerken. Im Jahr 1963 bewiesen Walter Feit und John Thompson ein Theorem, mit dem man neue einfache endliche Gruppen finden konnte. Und 1972 skizzierte Gorenstein einen 16-Stufen-Plan für ein Projekt, das ein für alle Mal jeder einfachen endlichen Gruppe ihren Platz zuweisen würde. Dazu waren alle bekannten endlichen einfachen Gruppen aufzuzählen, die noch fehlenden aufzuspüren, alle in geeignete Kategorien einzuordnen und schließlich zu beweisen, dass es keine weiteren gibt. Diese letzte Aussage ist es, die das Riesentheorem so schwer macht. Zu beweisen, dass es etwas nicht gibt, ist oftmals viel mühsamer als ein Existenzbeweis. Das Vorhaben erschien gewaltig, geradezu unverschämt dreist und in den Augen mancher Leute undurchführbar.

Ein Mann mit Plan

Aber Gorenstein war ein charismatischer Algebraiker, und seine Vision weckte in einer Gruppe von Mathematikern einen Ehrgeiz, der weder einfach noch endlich war. »Er hatte eine übermenschliche Persönlichkeit«, sagte Lyons, der jetzt an der Rutgers University forscht. »Er hatte eine ungeheuer kühne Art, Probleme zu erfassen und ihre Lösung zu vermu-

ten. Und wenn es darum ging, andere zu seiner Unterstützung zu gewinnen, konnte er sehr überzeugend sein.«

Solomon, der seine erste Begegnung mit der Gruppentheorie als »Liebe auf den ersten Blick« beschreibt, lernte, damals als Doktorand, Gorenstein 1970 auf einer Sommerschule am Bowdoin College kennen. Der berühmte Mathematiker hinterließ einen unauslöschlichen Eindruck, nicht nur wegen seiner Genialität und seiner kühnen Vision. »Ich hatte noch nie einen Mathematiker gesehen, der in knallpinken Hosen herumläuft«, erinnert sich Solomon.

Noch 1972, sagt er, hätten die meisten Mathematiker nicht geglaubt, dass der Beweis vor Ende des Jahrhunderts komplett sein könnte; es dauerte jedoch nur weitere vier Jahre, bis das Ende in Sicht kam. Gorenstein schrieb diese Beschleunigung vor allem den originellen Methoden und dem geradezu fieberhaften Arbeitstempo von Michael Aschbacher zu, der heute Professor am California Institute of Technology ist.

1981 erklärte Gorenstein die erste Version des Beweises für vollständig; dieser Jubel erwies sich jedoch als voreilig. In

einem besonders verzwickten Text von 800 Seiten tauchte ein Problem auf und ließ sich erst nach vielen Diskussionen ausräumen. Gelegentlich behaupteten Mathematiker auch später noch, sie hätten weitere Lücken im Beweis oder neue Gruppen gefunden, die nicht auf der Liste standen. Bis heute hat der Beweis jedoch allen derartigen Angriffen standgehalten, und Solomon ist ziemlich zuversichtlich, dass das auch so bleiben wird.

Gorenstein erkannte schon früh, zu welchem undurchdringlichen Gestrüpp die Argumentation in jenen wilden Jahren ausgeartet war. Deshalb überredete er zunächst Lyons und 1982 beide gemeinsam Solomon, eine leichter zugängliche und organisierte Darstellung auszuarbeiten – einen »Beweis der zweiten Generation«. Sie wollten vorrangig die logische Grundstruktur der Argumentation darstellen, um künftigen Generationen deren Rekonstruktion zu ersparen, sagt Lyons. Bei dieser Gelegenheit sollte auch der Umfang des Beweises von 15 000 Seiten auf etwa 3000 bis 4000 schrumpfen.

Geplant hatte Gorenstein eine Buchreihe, die alle Beweisfragmente versammelt und in der richtigen logischen Abfol-

Vier Großfamilien

Die endlichen einfachen Gruppen sind gewissermaßen die Elemente, aus denen sich alle endlichen Gruppen zusammensetzen lassen. Das Riesentheorem teilt sie in vier Familien ein. Dem monströsen Beweis zum Trotz besteht das Theorem selbst nur aus einem Satz, der diese Familien aufzählt: »Jede endliche einfache Gruppe ist zyklisch von Primzahlordnung, eine alternierende Gruppe, eine endliche einfache Gruppe vom Lie-Typ oder eine der 26 sporadischen Gruppen.«

Die zyklischen Gruppen sind die wirklich einfachen unter den einfachen Gruppen. Dreht man zum Beispiel ein regelmäßiges Fünfeck um ein Fünftel des Vollwinkels (72 Grad) um seinen Mittelpunkt, dann erscheint es unverändert. Wiederholt man diese Drehung fünfmal, dann ist die Ausgangslage wieder erreicht. Zyklische Gruppen bestehen aus derartigen Wiederholungen einer einzigen Transformation. Ist die Anzahl ihrer Elemente eine Primzahl wie im Beispiel des Fünfecks, so ist die Gruppe einfach. Im anderen Fall lässt sie sich zerlegen.

Die alternierenden Gruppen stammen von den Permutationsgruppen ab. Eine Abbildung, welche die n Glieder einer endlichen Folge in eine neue Reihenfolge bringt, heißt Permutation. Die Menge aller Permutationen einer bestimmten Folge ist eine Gruppe, allerdings im Allgemeinen keine einfache. Aber man kann jede Permutation aus Transpositionen (Vertauschung von nur zwei Elementen) zusammensetzen. Die Gruppe aller Permutationen, die aus einer geraden Anzahl von Transpositionen bestehen, heißt alternierende Gruppe, und die ist stets einfach mit Ausnahme von $n=2$ und $n=4$. Ein Beispiel: Die Menge $\{1,2,3\}$ hat sechs Permutationen: $(1,2,3)$, $(2,3,1)$, $(3,1,2)$,

$(1,3,2)$, $(2,1,3)$ und $(3,2,1)$. Die alternierende Gruppe besteht nur aus den ersten drei.

Die Gruppen vom Lie-Typ sind gewissermaßen die armen Verwandten der (unendlichen) Lie-Gruppen, die den Namen des norwegischen Mathematikers Sophus Lie (1842–1899) tragen. Eine der einfachsten Lie-Gruppen enthält alle Drehungen um den Nullpunkt im gewöhnlichen dreidimensionalen Raum. Dessen Punkte werden durch drei reelle Zahlen (»Koordinaten«) beschrieben. Setzt man an die Stelle der reellen Zahlen einen endlichen Körper, das heißt eine Menge mit endlich vielen Elementen, in der man ebenso uneingeschränkt addieren und multiplizieren kann wie in den reellen Zahlen, dann werden aus den Lie-Gruppen diejenigen vom Lie-Typ. Sie bilden die mit Abstand reichhaltigste unter den vier Familien. Ebenso wie die Lie-Gruppen selbst gibt es auch Gruppen vom Lie-Typ zu Räumen beliebig hoher Dimension.

Die sporadischen Gruppen bilden nicht wirklich eine Familie. Es handelt sich um ein Sammelbecken für 26 Einzelgänger, die sich nicht in eine der anderen Familien einfügen. Die größte unter ihnen, das so genannte Monster, enthält mehr als 10^{23} Elemente und lässt sich als eine Gruppe von Kongruenzabbildungen auffassen – aber nur in einem Raum von mindestens 196 883 Dimensionen. Sie ist rätselhaft und bizarr, und niemand weiß wirklich, was sie bedeutet. »Ich habe die heimliche, durch nichts gestützte Hoffnung«, schrieb der Physiker Freeman Dyson 1983, »dass die Monstergruppe auf irgendeine Weise in die Struktur des Universums eingebaut ist und irgendwann im 21. Jahrhundert ein Physiker darüber stolpern wird.«

Die Mathematik der Verknüpfungen

Die Anfänge der Gruppentheorie sind untrennbar mit einer tragischen Geschichte verbunden. Évariste Galois, ein heißblütiger französischer Revolutionär, kämpfte ebenso leidenschaftlich für den Sturz der Monarchie in seiner Heimat, wie er die Mathematik seiner Zeit bis an die Grenzen ihrer Möglichkeiten trieb. Noch als Jugendlicher erkundete Galois neue Wege zum Lösen von Gleichungen und stieß dabei auf überraschende Beziehungen zwischen völlig verschiedenen mathematischen Gebieten – wenn er nicht gerade im Gefängnis saß.

Galois war genial, aber vom Unglück verfolgt. Er starb 1832 im Alter von 20 Jahren an einem Bauchschuss, den er in einem Duell wegen einer Liebesbeziehung erlitt. Historiker haben darüber spekuliert, ob dieses Duell ein Mordanschlag, ein inszenierter Selbstmord oder einfach die tragische Folge einer unerwiderten Liebe war. Jüngere Forschungen deuten darauf hin, dass nur eine der Pistolen geladen war, und zwar nicht die in der Hand des jungen Genies. »Ich sterbe als Opfer einer berühmten Kokotte und ihrer beiden Tölpel«, schrieb er in der Nacht vor dem Duell in einem Brief. In einem weiteren in dieser Nacht ver-

fassten Schriftstück führte er viele seiner Ideen über Gruppen skizzenhaft aus. Im Verlauf der folgenden anderthalb Jahrhunderte erblühte aus diesen letzten Worten eines todgeweihten Mannes die Gruppentheorie (Spektrum der Wissenschaft 4/2012, S. 52).

Zunächst mag sie als ein abstraktes Glasperlenspiel erschienen sein, aber zu Beginn des 20. Jahrhunderts fand die deutsche Mathematikerin Emmy Noether eine Verbindung zwischen der Gruppentheorie und den Erhaltungssätzen der Physik (Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 70). So gilt der Energieerhaltungssatz, weil für alle physikalischen Gesetze eine Verschiebung in der Zeit eine Symmetrietransformation ist.

In der Folge von Noethers genialen Arbeiten verwendeten die theoretischen Physiker die Gruppentheorie auch, um die Symmetriebeziehungen zwischen Elementarteilchen zu verstehen und insbesondere viele Teilchen vorherzusagen, die noch nicht entdeckt waren. Damit verließ die Theorie endgültig den Elfenbeinturm und wurde zu einem der mächtigsten Hilfsmittel zum Verständnis der Realität.

ge wiedergeben sollte; außerdem galt es, die zahllosen Eigenheiten der Urheber auszubügeln und Doppelungen zu streichen. In den 1980er Jahren war der Beweis ein Buch mit sieben Siegeln für jedermann – mit Ausnahme der kampfgestählten Pioniere aus der Entstehungsphase. Denen aber war es ein dringendes Anliegen, die Früchte ihrer jahrzehntelangen Bemühungen nicht in Bibliotheken verstauben zu lassen, sondern der nachfolgenden Generation weiterzureichen.

Gorenstein wird die Vollendung seines Vorhabens nicht mehr erleben: Er starb 1992 an Lungenkrebs. »Er hörte niemals auf zu arbeiten«, erinnert sich Lyons. »Am Tag vor seinem Tod führten wir noch drei Gespräche, alle nur über den Beweis. Kein Wort des Abschieds, es ging ausschließlich um die Arbeit.«

Monsterbeweis – zweiter Versuch

Der erste Band der Reihe, die den Beweis der zweiten Generation enthalten soll, erschien 1994. Er hat eher den Charakter einer Einführung als den einer üblichen mathematischen Abhandlung und enthält nur zwei der insgesamt 30 geplanten Kapitel. Der zweite Band folgte 1996 und dann weitere, der sechste 2005.

Foote bescheinigt dem Werk einen Erfolg. »Die bisher erschienenen Kapitel sind viel besser organisiert«, sagt er. »Außerdem kommt es darauf an, dass der gesamte Beweis an einem Ort versammelt ist. Sonst bleibt von ihm nur Hörensagen: Jeder hält ihn für vollständig, aber keiner kann sich davon überzeugen.«

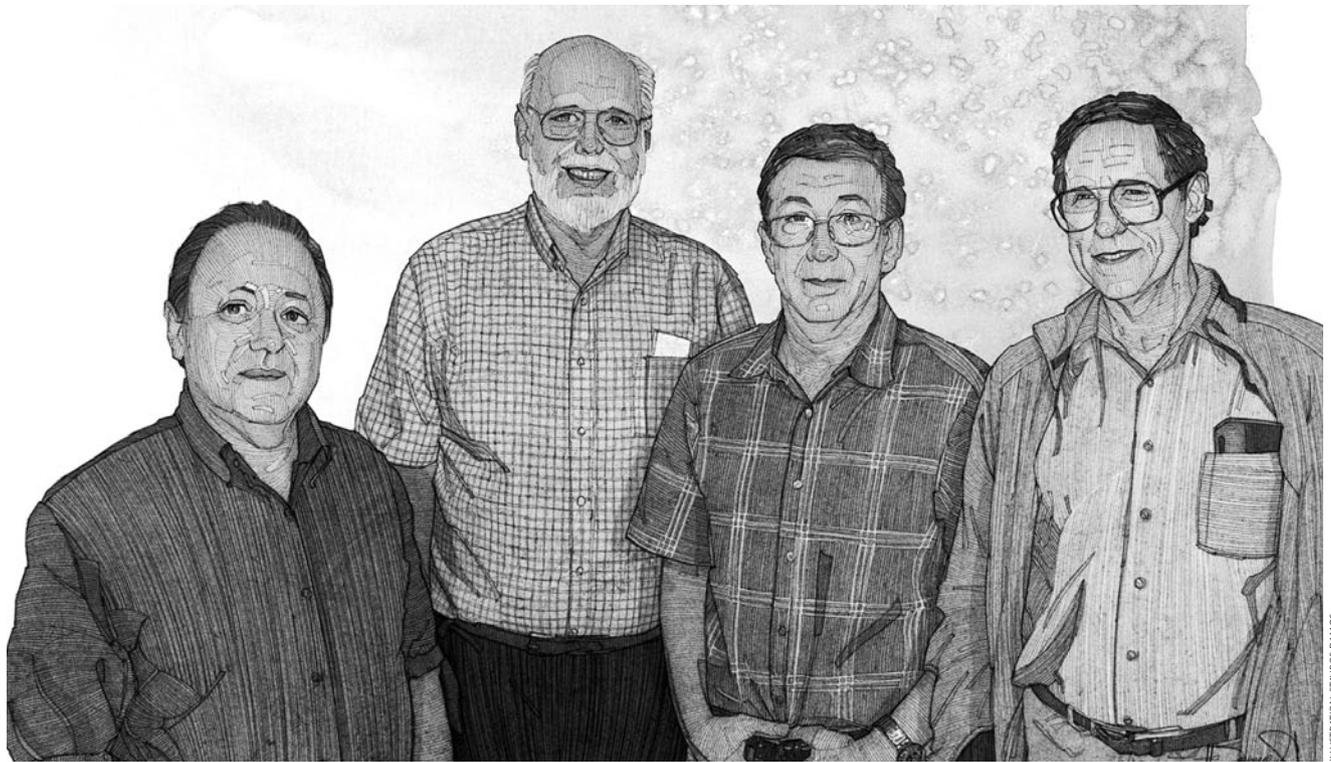
Solomon und Lyons wollen den siebten Band 2016 abschließen, und eine kleine Gruppe von Mathematikern hat bereits damit begonnen, Teile des achten und neunten aus-

zuarbeiten. Nach Solomons Schätzung wird der »gestraffte« Beweis am Ende zehn oder elf Bände umfassen. Demnach hätten die vier alten Herren etwas mehr als die Hälfte ihres langen Weges hinter sich.

Aber selbst das Gesamtwerk, so Solomon, wird nicht jedes Argument detailliert ausführen, sondern auf ergänzendes Material und anderswo veröffentlichte Resultate verweisen. Das entspricht der kumulativen Natur der Mathematik: Jeder Beweis ist nicht nur Produkt seiner Zeit, sondern all der Gedanken aus den Tausenden von Jahren zuvor.

In einem 2005 erschienenen Artikel in den »Notices of the American Mathematical Society« gab der Mathematiker E. Brian Davies vom King's College in London eine pessimistische Prognose ab: »Der Beweis ist noch nie in seiner Gesamtheit aufgeschrieben worden; das wird auch möglicherweise nie gelingen; und selbst in der vorgesehenen Form wird kein einzelner Mensch ihn zur Gänze nachvollziehen können.« Diese düsteren Worte weckten die Befürchtung, dass gewisse mathematische Bemühungen aus sehr prinzipiellen Gründen das Denkvermögen eines Sterblichen übersteigen könnten, und veranlassten Smith und seine drei Mitautoren, erst einmal außer der Reihe das vergleichsweise knappe Buch zusammenzustellen, dessen Erscheinen mit der Party in Oak Park gefeiert wurde.

Und selbst wenn heute kein Fachkundiger – von den Amateuren ganz zu schweigen – den Beweis versteht, ist doch die Arbeit nicht vergebens. Mathematiker wissen ohnehin in der Regel nicht, wozu ihre gegenwärtige Arbeit nützlich ist. Sie produzieren abstrakte Wahrheiten »auf Vorrat«; deren Wert erweist sich vielleicht erst Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte später außerhalb ihres Gebiets. »Und vielleicht kommt in ei-



Auf Rettungsmission: Die Mathematiker Ronald Solomon, Richard Lyons, Michael Aschbacher und Stephen D. Smith (von links nach rechts) fürchten, sie könnten die Letzten sein, die den verwickelten Beweis des Riesentheorems verstehen – es sei denn, sie produzieren eine sauber durchstrukturierte Version für die Nachwelt.

nigen Jahrzehnten ein Genie mit Ideen, die für uns undenkbar sind, und schafft mit unserem Material die Klarheit, die uns noch fehlt«, sagt Solomon.

Die Jahrzehnte tiefen Nachdenkens brachten nicht nur den Beweis voran, sondern führten auch zur Herausbildung einer speziellen Gemeinschaft. Judith Baxter – selbst studierte Mathematikerin – sagt, Gruppentheoretiker bildeten eine außergewöhnlich soziale Gruppe. »Die Leute bleiben oft Freunde fürs Leben«, bemerkt sie. »Man trifft sich, reist gemeinsam, geht miteinander zu Partys – es ist wirklich eine wundervolle Gemeinschaft.«

Es ist nicht überraschend, dass die alten Meister bei der Vollendung ihres Werks die Hilfe jüngerer Kollegen in Anspruch nehmen wollen. Die sind aber nicht leicht zu finden: Es ist nicht unbedingt attraktiv oder ruhmesträchtig, die Gedanken anderer Leute nachzuvollziehen, mögen sie auch noch so schwierig sein. Wer diesem Ziel seine Karriere widmet, muss schon eine tiefe Liebe zur Gruppentheorie empfinden.

Solomon hat Glück gehabt. Inna Capdeboscq von der University of Warwick in England entdeckte ihre Begeisterung für das Thema in einem seiner Kurse. Mittlerweile zählt die heute 44-Jährige zu den wenigen jüngeren Mitstreitern am

Projekt. Gemeinsam mit Solomon hat sie Teile des Beweises ausgearbeitet, die in den sechsten Band einfließen.

Capdeboscq vergleicht ihre Bemühungen mit dem Ausmalen der Rohskizze eines Gemäldes. Gorenstein, Lyons und Solomon haben den Plan entworfen, und sie sieht es als die Aufgabe der jungen Leute, den verschiedenen Teilen ihre jeweiligen Positionen zuzuweisen: »Wir kennen den Plan, und wenn wir ihm folgen, dann sollte am Ende der vollständige Beweis entstehen.« ~

DER AUTOR



Stephen Ornes ist Wissenschaftsjournalist in Nashville (Tennessee). Seine Biografie der großen Mathematikerin Sophie Germain erschien im Jahr 2008.

QUELLEN

Gorenstein, D.: The Classification of the Finite Simple Groups: A Personal Journey. The Early Years. In: Duren, P. (Hg.): A Century of Mathematics in America, Part I. American Mathematical Society, Providence (RI), S. 447–476, 1998

Livio, M.: The Equation That Couldn't Be Solved: How Mathematical Genius Discovered the Language of Symmetry. Simon & Schuster, 2005

Ronan, M.: Symmetry and the Monster: One of the Greatest Quests in Mathematics. Oxford University Press, 2006

Solomon, R.: A Brief History of the Classification of the Finite Simple groups. In: Bulletin of the American Mathematical Society 38, S. 315–352, 2001

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1378756

Frieden stiftende Ahnen

Die ersten Großsiedlungen der Geschichte entstanden vor 9500 Jahren im Nahen Osten. Interdisziplinäre Forschungen zeigen, welche enormen Herausforderungen die neue Art des Zusammenlebens für die Menschen bedeutete.

Von Marion Benz



MIT FOTO: GEN. DER FOUILLE FRANCO-SYRIENNE DE TELL ASWAD; COORDINATION DANIELLE STORDEUR ET BASSAM JAMMOUS; MISSION EL KOWM; MUSEUM DU MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES FRANCE; PHOTO: L. DUGUÉ

DIE NEUE SERIE IM ÜBERBLICK

DIE GEBURT DER STADT

Teil 1	▶ Frieden stiftende Ahnen <i>Marion Benz</i>	März 2016
Teil 2	▶ Die ersten Metropolen <i>Simon M. Halama</i>	April 2016
Teil 3	▶ Im Schatten der Tempel <i>Peter R. Fuchs und Renate Patzschke</i>	Mai 2016



Wie Totenmasken muten uns heute diese Schädel aus der Siedlung Tell Aswad an: Mit Ton hatte man ihnen Gesichtszüge aufmodelliert.

Das Gedränge im Haus war groß. Jeder wollte zusehen, wie der Schädel ins Grab der Toten gebettet wurde. Zusammengekauert als würde sie schlafen, lag die junge Frau in der Grube, die man im Fußboden des Hauses ausgehoben hatte, in ihren Armen der Schädel. Doch der sah nicht aus wie ein Skelettrest, denn mit weichem Kalkmergel waren ihm Gesichtszüge modelliert worden. Mindestens dreimal hat man die Modelliermasse erneuert und mit Ocker rot bemalt. 8500 Jahre später entdeckten Archäologen diese Bestattung in einer der größten steinzeitlichen Siedlungen Anatoliens, in Çatal Hüyük. Welche Bedeutung mochte diese Form des Totenkults gehabt haben? Interdisziplinäre Forschungen der letzten Jahre legen nahe, dass es solcher sozial integrierender Rituale und fester Regeln bedurfte, um viele hundert oder gar tausend Menschen gemeinsam in einem Ort leben zu lassen.

Die ersten Ansiedlungen gab es im Nahen Osten bereits im 19. Jahrtausend v. Chr., im Lauf des 12. Jahrtausends v. Chr. begann man, die Verstorbenen unter dem Fußboden der Wohnhäuser zu beerdigen. In der Vorstellung der Menschen weilten diese vermutlich nun weiter in ihrer Mitte. Mitunter wurde auch damals schon das Grab nach der Verwesung wieder geöffnet und der Schädel entnommen, um ihn rituell zu nutzen. Wahrscheinlich hatte die betreffende Person zu Lebzeiten eine besondere Stellung innegehabt, im Totenkult erlebten sich die Teilnehmer als Mitglieder einer Gemeinschaft.

Solche identitätsstiftenden Rituale wurden in den wachsenden Dörfern notwendig. Denn dem britischen Anthropologen Robin Dunbar zufolge ist der Mensch für das Leben in Gruppen von bis zu 150 Mitgliedern veranlagt. Danach wird es schwierig, soziale Kontrolle und Vertrauen durch persönliche Verbindungen aufrechtzuerhalten. Der Nachbar wird zum Fremden. Das wohl eindrucklichste Relikt sozial integrierender Mechanismen sind die monumentalen Kultanlagen vom Göbekli Tepe in der Südosttürkei, einem Hügel nahe der Provinzhauptstadt Şanlıurfa (gesprochen Schanleurfafa). Mehr als fünf Meter ragen dort tonnenschwere Steinpfeiler in die Höhe, verziert mit zähnefletschenden Raubtieren, bedrohlichen Keilern, Skorpionen und Schlangen (siehe Bild S. 59). Mehr als 200 solcher Pfeiler könnten einst in meh-

MIT FRIEDL. GEN. DER FOUILLE FRANCO-SYRIENNE DE TELL ASWAD. COORDINATION DANIELLE STORDEUR ET BASSAM JAMMAOUS. MISSION EL KOWM-MUREYBET DU MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES FRANCE. PHOTO: L. DUCHE

renen Steinkreisen aufgestellt worden sein. Bislang wurde erst ein Bruchteil des Geländes ausgegraben.

»Allein schon der Bau dieser gigantischen Anlagen muss die Beteiligten zusammengeschweißt haben«, betont Lee Clare, Referent am Deutschen Archäologischen Institut und Nachfolger des Entdeckers und ersten Ausgräbers Klaus Schmidt. »Sicher trafen sich dort Menschen von nah und fern.« Dass sie sich einer Gemeinschaft zugehörig fühlten, zeigt das in der ganzen Region verwendete Symbolsystem, zu dem Schlangen, Skorpione, Raubkatzen und Vögel ebenso zählten wie konzentrische Kreise, Halbmonde und v-förmige Zeichen. Vom Güsir Tepe, beim heutigen Siirt, nahe der türkisch-irakischen Grenze bis zum fast 500 Kilometer entfernten Tell Qaramel, einem Siedlungshügel im Nordwesten Syriens, benutzten die Pioniere des sesshaften Lebens diese Zeichen und kombinierten sie auf eigene Weise.

Eine solch einheitliche figürliche Symbolik gab es weiter im Süden, in der Levante hingegen nicht. Hier fand der erwähnte Schädelkult seinen Ursprung und war weit verbreitet.

AUF EINEN BLICK

SOZIALE EXPERIMENTE

1 Im **8. Jahrtausend v. Chr.** entstanden im Nahen Osten erstmals Großsiedlungen mit bis zu 15 Hektar Fläche und mehreren tausend Einwohnern, so genannte **Megasites**.

2 Aufflammende **Konflikte** mussten in dieser ungewohnten sozialen Verdichtung durch **neue Regeln des Zusammenlebens** kontrolliert werden. Dazu dienten auch Rituale wie Bestattungszeremonien, die das Gefühl einer **gemeinsamen Identität** stärkten.

3 Megasites waren ein frühes Experimentierfeld für **präurbanen Leben**. Spätestens im Lauf des 7. Jahrtausends v. Chr. wurden die meisten von ihnen aufgegeben. **Übernutzung von Ressourcen** und eine **Klimaverschlechterung** gelten als wahrscheinliche Ursachen.

In den Regionen zwischen Südsyrien und dem Toten Meer kam ab Mitte des 9. Jahrtausends v. Chr. sogar der Brauch auf, die Gesichtspartien der »Reliquien« mit Ton oder Gips zu überziehen, um Gesichter nachzuformen. Danielle Stordeur vom französischen Centre National de la Recherche Scientifique in Lyon und Rima Khawam vom Nationalmuseum in Damaskus haben vor dem Ausbruch des Syrienkriegs einige solcher Schädel in der neolithischen Siedlung Aswad im Damaskusbecken ausgegraben. »Jeder trug ganz eigene Gesichtszüge«, erzählt Stordeur.

Eine Zeit lang waren diese in die Gemeinschaft zurückgeholt worden: Teilweise war die Übermodellierung abgeplatzt, mitunter erneuert oder mit weiteren Schichten überzogen worden. Fragmente von Schädeln, die bei Ausgrabungen gefunden wurden, lassen vermuten, dass sie von einer erhöhten Position heruntergestürzt sein müssen. Wie es mit diesen Kultobjekten weiterging, zeigen Deponierungen in Gruben, nicht mehr benutzten Räumen oder Lücken zwischen Häusern, in denen mehrere davon offenbar rituell beigesetzt worden sind. Vermutlich war auch das ein Akt, bei dem die Menschen zusammenkamen, um ihre Ahnen zu ehren – und sich als Mitglieder ihrer Dorfgemeinschaft zu fühlen.

Wie lange konnten diese Traditionen jedoch dem rasanten Wachstum der Dörfer standhalten? Im Lauf des 8. Jahrtausends wuchsen manche Orte zwischen dem Hochland von Amman und dem Roten Meer innerhalb weniger Jahrhunderte auf bis zu 15 Hektar mit mehreren tausend Einwohnern (siehe Karte links). Diese »Megasites«, wie sie der amerikanische Archäologe Gary Rollefson nennt, stellten alles Vorherige in den Schatten. Der Göttinger Paläopathologe Michael Schultz sieht den Hauptgrund der Bevölkerungsexplosion in der produzierenden Wirtschaftsweise mit Ackerbau und Viehzucht. Nahrung ließ sich verlässlicher erzeugen, damit boten sich bessere Überlebenschancen für Kinder. Manche Archäologen wie der Berliner Prähistoriker Hans Georg K. Gebel halten das allein nicht für ausreichend, vielmehr seien auch noch Migranten aus bereits überbevölkerten Regionen westlich des Jordans gekommen und hätten



Die Megasites genannten Großdörfer waren ein Phänomen des 8. und 7. Jahrtausends v. Chr.

mit zur Entstehung dieser Großsiedlungen beigetragen. Die Megasites prosperierten und entwickelten sich zu Handelsplätzen für regionale Produkte und exotische Waren. Der Archäometallurge Andreas Hauptmann von der Ruhruniversität Bochum konnte nachweisen, dass Türkis vom Sinai in das Gebiet des heutigen Jordanien importiert wurde. Malachit kam aus Timna nahe dem Golf von Akaba und vom Wadi Feinan, Obsidian, ein messerscharfes Vulkanglas, aus der zentralen Türkei und der Van-See-Region, vielleicht auch von der Arabischen Halbinsel. Korallen und Muscheln stammten vom Roten Meer.

Auch 'Ain Ghazal, das 1974 beim Bau einer Umgehungsstraße in Amman entdeckt wurde, gehört zu diesen Stätten. Mitte des 8. Jahrtausends schnellte seine Einwohnerzahl innerhalb weniger Jahrhunderte von einem 700-Seelen-Dorf auf stolze 3000 bis 4000, schätzt Rollefson, der von 1982 bis Ende der 1990er Jahre dort gegraben hat. Gemeinsam mit seinem jordanischen Kollegen Zeidan Kafafi untersuchte der amerikanische Archäologe Wohnhäuser, aber auch Gebäude, die sich in Architektur und Ausstattung unterscheiden, was auf eine zunehmende Differenzierung der Gesellschaft hinweist. Wie in Aswad haben die Archäologen auch hier mehrere Deponierungen von übermodellierten Schädeln entdeckt.

Überlebenskampf statt Totenritual

Im Lauf der Zeit verlor der Schädelkult aber in allen Megasites offenbar an Strahlkraft. Zwar wurden weiterhin isolierte Totenköpfe in Depots bestattet, doch immer seltener waren ihnen Gesichtszüge aufmodelliert worden. Immer stärker bekamen die steinzeitlichen Siedler die Nachteile der hohen Bevölkerungsdichte zu spüren: der Übernutzung von Ressourcen. Vor allem der Bedarf an Feuerholz muss hoch gewesen sein. Auch die Domestikation der Ziege offenbarte ihre Schattenseite: Das Nutztier fraß Baumsprösslinge und verhinderte so, dass sich der Baumbestand regenerieren konnte. Andererseits mieden Wildtiere die Territorien der Megasites. Der Anbau von Getreide und Hülsenfrüchten verdrängte zunehmend wilde Pflanzen wie Mandeln, Pistazien und Feigen, so dass die Menschen von der Produktion ihrer Nahrung abhängig wurden. Gegen Ende des 8. Jahrtausends ging es schlicht um das Überleben!

»Bei steigenden Bevölkerungszahlen und gleichzeitig rückläufigen Ressourcen müssen die sozialen Spannungen in und zwischen den Megasites enorm gewesen sein«, meint Rollefson. Das scheinen die archäologischen Befunde aus der jordanischen Stätte Basta zu belegen (siehe Karte links). Der Ort ist ein Beispiel für jene Großsiedlungen, die in der Boomphase zwischen 7500 und 7000 v. Chr. erst entstanden. Die Menschen wohnten hier derart dicht an dicht, dass es kaum Wege und Plätze gab – das öffentliche Leben fand auf den Dächern statt. Auch in Basta bestattete man die Toten unter dem Fußboden.

Halbedelsteine, Muscheln und Korallen, die bei den Ausgrabungen gefunden wurden, zeigen zwar, dass die Bewohner in ein weites Handelsnetz integriert waren. Dennoch war

das Leben hier nicht immer friedlich. Bis ins Detail haben Michael Schultz und seine Kollegin Margit Berner vom Naturhistorischen Museum Wien einige Skelette aus Basta untersucht. 5 von 29 Individuen wiesen Schädelfrakturen auf. Ob diese allerdings von Konflikten innerhalb der Gemeinschaft, von Kämpfen bei ihrer Verteidigung oder eigenen Angriffen auf andere Siedlungen stammten, lässt sich heute nicht mehr entscheiden. Bemerkenswert ist, dass etliche Betroffene die schweren Verletzungen mehrere Jahre überlebten – die Brüche waren verheilt.

Mineralisationsstörungen im Zahnschmelz fanden die Anthropologen bei fast 80 Prozent der Individuen, was auf Krankheiten oder Mangelernährung in der Kindheit und Jugend hinweist. So genannte Harris-Linien in den Langknochen, Anzeichen für ein stockendes Wachstum, wurden sogar bei allen untersuchten Erwachsenen gefunden. Ein Drittel der Bewohner von Basta litt an Anämie, einem Mangel an Hämoglobin, das in den roten Blutkörperchen normalerweise den Sauerstoff bindet. Fehlt dieses wichtige Protein, ist der



DAN NICO BECKER, MIT FRED GERN, VON NICO BECKER

Eine Raubkatze vor dem Sprung, darunter ein Eber – wilde Tiere zieren die 11 000 Jahre alten Pfeiler der Kultstätte Göbekli Tepe.

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



www.spektrum.de/t/staedte



FOTOLIA / MANDRITOU

Sauerstofftransport vermindert. Eine siebartige Struktur des Knochens in der Augenhöhle kann ein Indiz für eine solche länger anhaltende Blutarmut sein. Mangelernährung könnte eine Ursache dafür sein, doch es gibt noch viele andere. Tatsächlich entdeckten die Anthropologen keine eindeutigen Anzeichen für eine unzureichende Ernährung: Nur zwei Kinder von 24 untersuchten Skeletten hatten Skorbut, was auf chronische Vitamin-C-Unterversorgung zurückzuführen ist. Zum Vergleich: Im Europa der Jungsteinzeit betrug dieser Anteil auch schon mal 40 Prozent.

Der frühe Tod gehörte zum Leben

Offenbar erlebte nur jeder zweite Einwohner Bastas seinen 20. Geburtstag: Über 50 Prozent der ausgegrabenen Skelette stammen von Kindern und Jugendlichen. In anderen zeitgleichen Orten wie Jericho, Abu Hureyra in Nordsyrien oder 'Ain Ghazal sah es ähnlich aus. Bis ins 19. Jahrhundert hinein kam dergleichen aber immer wieder vor, denn ohne Antibiotika konnte beispielsweise eine Mittelohrentzündung oder ein eitriger Abszess den Tod bedeuten. Diese Statistik lässt sich daher nicht als Indiz für Konflikte oder Hungersnöte heranziehen. Das gilt auch für das steinzeitliche Beidha. 76 Prozent der Skelette, die unter den Häusern gefunden wurden, stammten von Kindern. Ein so ungewöhnlich hoher Wert lässt aber vermuten, dass es dafür andere Gründe gegeben haben könnte als eine extrem hohe Kindersterblichkeit. Möglicherweise wurden Kinder und Jugendliche bevorzugt innerhalb der Siedlung beigesetzt, ihre Eltern hingegen außerhalb. Auch in Aswad und Abu Hureyra wurden die Toten nicht gleich behandelt, allerdings war die Unterscheidung nicht so strikt. Männer bestattete man häufig außerhalb der Häuser, Frauen und Kinder unter dem Fußboden.

Aber nicht nur der Umgang mit den Toten musste in den Großsiedlungen geregelt werden. Soziale Vorschriften griffen zunehmend auch ins Privatleben ein. Dies legen Forschungen von Kurt W. Alt nahe. Der Anthropologe der Danube Private University Krems hat Zähne und Kiefer aus Basta ebenfalls untersucht, doch unter einer anderen Fragestellung. Für jedes Individuum verglich er mehr als 1000 Merkmale mit denen anderer Populationen aus der Region. »Bei einem Drittel fehlten die seitlichen oberen Schneidezähne. Heutzutage kommt dies weltweit nur bei etwa ein bis zwei Prozent vor. Auch in anderen zeitgleichen Populationen ist

dieses Merkmal sehr selten«, erklärt Alt. Sein Fazit: »Die Bewohner von Basta waren also eng miteinander verwandt.« Trotz weit reichender Kontakte mit anderen Großsiedlungen blieb man eher unter sich. Strontiumisotope, die während der Kindheit in den Zähnen eingebaut werden, bestärken die These: Fast alle untersuchten Personen wuchsen in Basta und der nächsten Umgebung auf. Hans Georg K. Gebel ist davon überzeugt, dass großfamiliäre Strukturen die Kommunen in der Anfangsphase sozial und wirtschaftlich stabilisieren konnten, was sich auch im Schädelkult, in der Verehrung gemeinsamer Ahnen ausdrückte. »Wenn viele Mitglieder der Gemeinschaft miteinander verwandt sind, reduziert das Konfliktpotenziale. Außerdem steht man füreinander eher ein, als um Ressourcen zu konkurrieren«, meint Gebel. Allerdings folgten nicht alle Megasites diesem Muster. In Kfar HaHoresh (siehe Karte S. 58), das vermutlich der Bestattungsort eines solchen Großdorfs war, heirateten etliche Frauen wohl Männer von außerhalb der Siedlung. Isolierte Schädelbestattungen fanden sich jedoch auch dort. Es gab folglich Konventionen, die jeder kannte und die das sesshafte Leben in Ballungsräumen regelten.

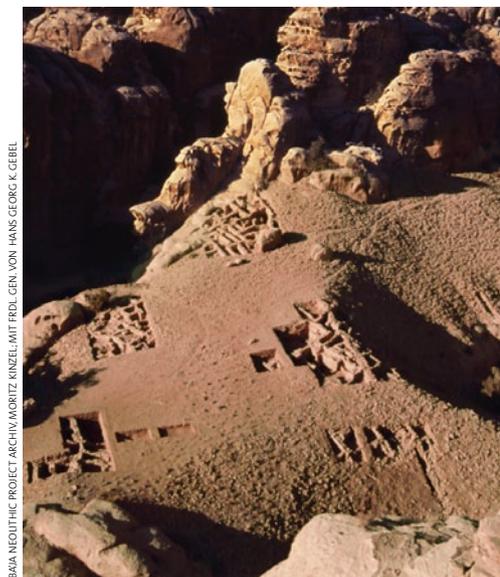
Weil die verschiedenen Großfamilien aber über Generationen wuchsen, während ihr jeweiliger Anteil an Feldern, Weiden und Wohnflächen vermutlich gleich blieb, waren Konflikte nach Ansicht von Gebel unausweichlich. Im zeitgleichen Ba'ja, wo der Prähistoriker ausgegraben hat, spiegelt sich das eindrücklich wider. Der Ort liegt auf fast 1200 Meter Höhe, ist von zerklüfteten Sandsteinbergen umgeben und nur über Bergpfade sowie eine tiefe Schlucht erreichbar. Welchen anderen Grund hätte es für einen Rückzug in eine natürliche Festung geben können als den Schutz vor Überfällen?

Anfang des 7. Jahrtausends v. Chr. hatten sich die Lebensbedingungen in der südlichen Levante scheinbar so weit verschlechtert, dass dort viele Großsiedlungen aufgegeben wurden. Dabei dürften klimatische Veränderungen die Lage noch verschärft haben: »Um 7000 schwankten die Niederschläge derart, dass die Ernteerträge einfach nicht mehr kalmit kulierbar waren«, beschreibt Rollefson die prekäre Situa-



MARKON BENZ

Basta, 9000 Jahre nach seiner Errichtung: Noch immer künden die Ruinen mit roten Farbputzresten von der einstigen Lebensweise.



BAJA NEOLITHIC PROJECT ARCHIV/MORITZ KINZEL MIT FOT. VON HANS-GEORG K. GEBEL



BAJA NEOLITHIC PROJECT ARCHIV/MORITZ KINZEL MIT FOT. VON HANS-GEORG K. GEBEL

Eine dichte Bebauung, die fast ohne Gassen und öffentliche Plätze auskam – auch Ba'ja im Gebirge Jordaniens war eine neolithische Megasite. Dass die Zeiten nicht frei von bewaffneten Konflikten waren, verrät ihre Lage: Eine tiefe Schlucht und zerklüftete Felsen erschwerten Angreifern den Zugang (links: Grabungsstätte, rechts: Rekonstruktion).

tion. »Ain Ghazal verlor 90 Prozent seiner Bevölkerung in etwa einem Jahrhundert.«

Verblüffenderweise wiederholte sich die Geschichte im Konyabecken in der Türkei: Immer mehr Menschen zogen im Lauf des 7. Jahrtausends nach Çatal Hüyük, wo schließlich bis zu 8000 Menschen auf 13,5 Hektar lebten. Ob diese Megasite von den Entwicklungen in der Levante profitierte, also womöglich durch Zuzug aus den aufgegebenen Großdörfern wuchs, dafür gibt es keine Belege. Ganz fremd aber war man sich nicht, vielmehr verschmolzen Traditionen der Levante mit denen Südostanatoliens und Nordmesopotamiens zu einer neuen Kultur. Wandmalereien und Reliefs griffen Motive auf, wie sie schon von den Jägern und Sammlern des Göbekli Tepe benutzt worden waren, während Bauweise und Totenkult an Traditionen aus der Levante erinnern. Doch statt in Kultgebäuden fand der britische Archäologe Ian Hodder expressive Symbole wie Leoparden, übermodellerte Auerochschenschädel, Wandmalereien und Reliefschmuck in den Wohnhäusern.

Wie in Basta gab es keine Gassen, nur über die Dächer gelangte man ins Hausinnere. Hodders Team entdeckte zahlreiche Spuren eines Alltags, der alles andere als idyllisch war: Der Rauch der Holzkohlefeuer belastete die Lungen und färbte die Rippen der Skelette schwarz, zwischen den Häuserblocks türmten sich Abfälle und Fäkalien, verlassene Häuser dienten als Müllgrube. Und überall wimmelte es von Mäusen.

Trotz der hohen Bevölkerungsdichte hielten die Menschen von Çatal Hüyük an der alten Tradition fest, ihre Toten im Haus zu bestatten. Es wurde jedoch im Lauf der Zeit immer schwieriger, den Kult durchzuführen. Allein unter dem Fußboden eines einzigen Hauses legten Anthropologen 60 Skelette frei. Unter einem der Häuser wurde der übermodellerte Schädel in den Armen der jungen Toten entdeckt. Aber dieser Verweis auf die Levante ist ein Einzelbefund: Während in der Ursprungsregion des Kults bislang an die 80 verzierte Schädel ausgegraben wurden, haben die Archäolo-

gen in Çatal Hüyük in über 25 Jahren intensiver Grabungen nur ein einziges komplettes Exemplar entdeckt. Vielleicht war er das letzte Zeugnis jener Tradition, die einst die Bewohner der Megasites verband.

Die meisten Megasites wurden spätestens im Lauf des 7. Jahrtausend aufgegeben, die wenigen Ausnahmen schrumpften zu kleinen Dörfern zusammen. Es sollte zwar Jahrtausende dauern, bis das Experiment, so viele Menschen in einem Ort leben zu lassen, wiederholt und erweitert wurde. Der Grundstein für ein Zusammenleben in großen Gemeinschaften war jedoch damals in den neolithischen Megasites gelegt worden, nicht nur durch neue Formen der Architektur, sondern vor allem durch die Menschen selbst und die sozialen Regeln, denen sie sich verschrieben hatten. ~

DIE AUTORIN



Marion Benz ist Archäologin und Wissenschaftsjournalistin. Sie war an der Erforschung des Körtek Tepe in der Südosttürkei beteiligt, einem der ältesten, dauerhaft besiedelten Orte des Nahen Ostens.

QUELLEN

- Alt, K. W. et al.:** Earliest Evidence for Social Endogamy in the 9000-Year-Old Population of Basta, Jordan. In: Plos One 10.1371/journal.pone.0065649, 2013
- Benz, M., Bauer, J.:** Symbols of Power – Symbols of Crisis? A Psycho-Social Approach to Early Neolithic Symbol Systems. In: Neo-Lithics 2/13, S. 11–24, 2013. Online unter: www.exoriente.org/docs/00073.pdf
- Bienert, H.-D. et al. (Hg):** Central Settlements in Neolithic Jordan. Studies in Early Near Eastern Production, Subsistence and Ecology 5, Ex Oriente, Berlin 2004
- Hodder, I.:** The Leopard's Tale. Revealing the Mysteries of Çatalhöyük. Thames & Hudson, London 2006

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1398158

Altersbestimmung dank Atomtests

Oberirdische Kernwaffentests haben Mitte des 20. Jahrhunderts den Anteil des Radiokohlenstoffs (^{14}C) in der Atmosphäre wie in der Biosphäre kurzfristig hochschnellen lassen. Dieser » ^{14}C -Bombenpeak« soll nun zur Klärung einer Vielzahl von bis dato offenen Fragen in Medizin, Forensik und weiteren Disziplinen beitragen.

Von Eva Maria Wild und Walter Kutschera

Fällt die Bezeichnung ^{14}C im Zusammenhang mit Datierung, geht es meist um die Altersbestimmung archäologischer Funde. Die in den 1940er Jahren entwickelte Radiokohlenstoffmethode avancierte in der Altertumskunde zum Goldstandard. Neuerdings findet allerdings eine Variante immer neue Anwendungen, die nicht auf dem radioaktiven Zerfall des Isotops beruht, sondern auf Kernwaffentests: Durch sie stieg Mitte des 20. Jahrhunderts der ^{14}C -Anteil in der Luft sprunghaft an, was nun zur Datierung von kohlenstoffhaltigen Proben aus junger Zeit dient.

Das klassische wie das »Bombenpeak«-Verfahren beruhen auf der Teilnahme des radioaktiven Kohlenstoffisotops ^{14}C am globalen Kohlenstoffkreislauf. Chemisch verhält es sich nicht anders als die stabilen Isotope ^{12}C und ^{13}C , weshalb Pflanzen ^{14}C bei der Fotosynthese aufnehmen und in Biomasse umsetzen; in Tiere und Menschen gelangt das Isotop über die Nahrung. Über die Abbauprodukte des Stoffwechsels wiederum geben Lebewesen Radiokohlenstoff an die Atmosphäre zurück. Erst der Tod beendet den steten Austausch.

Das radioaktiv zerfallende ^{14}C wird nun nicht mehr ersetzt. Daher lässt sich anhand der Isotopenverhältnisse $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ oder $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ – nach Korrektur einiger Störeffekte – eine Altersbestimmung der untersuchten Proben vornehmen. Weil der Zerfall des Radiokohlenstoffs mit einer Halbwertszeit von etwa 5700 Jahren erfolgt, eignet sich diese klassische Methode aber nur für die Datierung entsprechend früher Kulturen, deren Alter aus methodischen Gründen auf das Jahr 1950 bezogen wird.

Nur fünf Jahre nach eben diesem als »Gegenwart« definierten Nullpunkt verschoben sich die Verhältnisse der Kohlenstoffisotope kurzzeitig drastisch. Die ab 1952 von Großbritannien, den USA und der Sowjetunion bei oberirdischen Kernwaffentests verwendeten Wasserstoffbomben sorgten auf Grund der hohen Anzahl an freigesetzten Neutronen für eine rasche Verdopplung von ^{14}C in der Atmosphäre (normalerweise entsteht es in Folge der kosmischen Strahlung; siehe Grafik rechts). 1963 vereinbarten die genannten Atommächte einen Stopp aller Kernwaffentests in der Atmosphäre, unter Wasser und im Weltraum, da radioaktiver Fallout die Weltöffentlichkeit beunruhigte.

FOTO: NATIONAL NUCLEAR SECURITY ADMINISTRATION / NEVADA SITE OFFICE

kosmische Strahlung

Atmosphäre (N, O, Ar)

n

 ^{14}N $^{14}\text{C} + \text{p}$

n

 O_2 $^{14}\text{C} \text{O}_2$

Pflanzen + Ozeane

 (^{14}C)

Biosphäre

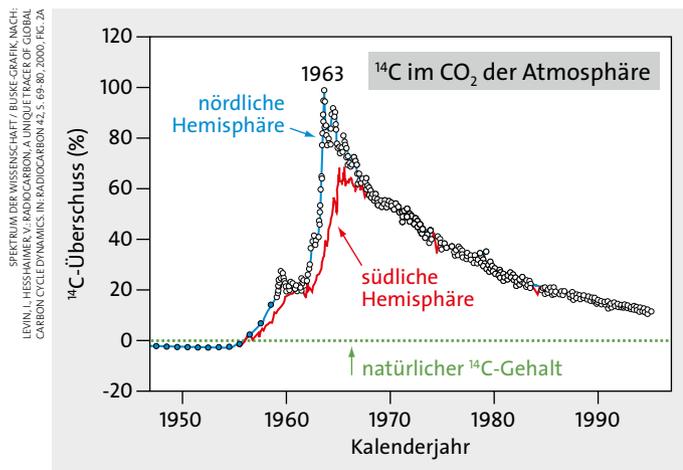
 (^{14}C)

Der erste Wasserstoffbombentest der USA am 1. November 1952 im Pazifik entwickelte bereits eine 700-mal größere Sprengkraft als die Atombombe von Hiroshima. Die dabei freigesetzten Neutronen verwandeln – nicht anders als die durch kosmische Strahlung erzeugten Neutronen – den atmosphärischen Stickstoff ^{14}N in radioaktives ^{14}C . Durch Kernwaffentests stieg der Gehalt an Radiokohlenstoff in der Luft kurzfristig an, was Forscher nun für Altersbestimmungen nutzen.

Andere Nationen traten dem Abkommen im Lauf der Zeit bei. Seitdem sinkt der ^{14}C -Wert wieder; er liegt heute nur mehr knapp über dem natürlichen Niveau. Oberirdische Kernwaffentests Frankreichs und Chinas bis 1974 beziehungsweise 1980 haben daran auf Grund ihrer geringeren Sprengkraft nichts geändert.

Die vorübergehende Verdopplung markierte die Lebewesen der Erde mit einem Überschuss an ^{14}C . Durch Verteilung des Isotops in den Ozeanen und der Biosphäre nahm die Konzentration rasch auf das heutige Niveau ab, so dass Forscher den ^{14}C -Bombenpeak zur Altersbestimmung von Proben aus der allerjüngsten Vergangenheit nutzen können.

Das Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg verfolgt diese Änderung der atmosphärischen Konzentration seit 1955. So misst die Heidelberger Umweltphysikerin Ingeborg Levin an verschiedenen Messstationen monatlich den ^{14}C -Anteil im CO_2 der Luft. Zusätzlich lässt sich der Radiokohlenstoffgehalt Jahr für Jahr in Baumringen bestimmen, so dass man eine sehr präzise Kalibrationskurve für die Zeit nach 1950 zur Verfügung hat. Wird also im Kohlenstoff einer entsprechend jungen Probe der ^{14}C -Anteil präzise bestimmt, kann man ihn durch Vergleich mit der Bombenpeakkurve je einem Zeitbereich auf der ansteigenden und auf der abfallenden Flanke zuordnen (siehe Grafik unten). Schließen zusätzliche Informationen einen der beiden Zeitbereiche aus, ist eine solche Zuordnung nahezu auf das Jahr genau möglich. Wie bei archäologischen Fragestellungen stehen für die Analysen oft nur Milli- oder gar Mikrogramm an Material zur Verfügung. Die Bestimmung erfolgt daher mit der Beschleunigermassenspektrometrie (siehe Spektrum der Wissenschaft, Spezial AGK 4/2014, S. 22), die das Atomverhältnis von ^{14}C zu den stabilen Kohlenstoffatomen in einer



Durch die bei Kernwaffentests freigesetzte Strahlung entstand im 20. Jahrhundert zusätzliches ^{14}C in der Atmosphäre. Zunächst unterschied sich dieser Überschuss in den beiden Hemisphären, glich sich nach dem Teststopp 1963 aber rasch aus, weil die Luftmassen offenbar gut durchmischt wurden. (Dass vor 1955 ein leichter ^{14}C -»Mangel« herrschte, war ein Effekt der CO_2 -Freisetzung aus fossilen Brennstoffen, die kein ^{14}C enthielten.)

AUF EINEN BLICK

DIE BOMBENPEAK-STOPPUHR

1 Atombombentests setzten ab 1952 Neutronen frei. Der Gehalt der Atmosphäre an dem **radioaktiven Kohlenstoff-Isotop ^{14}C** verdoppelte sich kurzzeitig, nahm aber rasch wieder ab.

2 Über die **Fotosynthese** der Pflanzen gelangte dieser Überschuss rasch in die **Biosphäre** und wurde auch in organische Substanzen von Tieren und Menschen eingebaut.

3 Inzwischen wird der ^{14}C -Gehalt in der **Forensik**, aber auch zur **Altersbestimmung verschiedener Gewebe** in der Grundlagenforschung eingesetzt.

Probe ermittelt. Der Nachweis erfolgt dabei direkt durch Zählen der ionisierten ^{14}C -Atome und nicht über die beim Zerfall ausgesandten Betateilchen, wie dies klassisch mittels gasgefüllter Zählrohre geschieht; das steigert die Empfindlichkeit mindestens um das Tausendfache.

Erste Anwendungen erfolgten in der Forensik, die nach wie vor einen Einsatzschwerpunkt bildet. Immer wieder müssen Gerichtsmediziner das so genannte Postmortem-Intervall (PMI) klären, also die Liegezeit einer Leiche beziehungsweise eines Skeletts bis zur Entdeckung. Unsere Arbeitsgruppe hat als eine der ersten die Tauglichkeit der ^{14}C -Bestimmung dafür an verschiedenen menschlichen Geweben untersucht. Die Idee war auch hier, dass ein lebender Organismus durch die Nahrung Kohlenstoff aufnimmt und in Gewebe einbaut. Deswegen ^{14}C -Wert sollte daher dem atmosphärischen Wert zum Todeszeitpunkt entsprechen.

Je nach Gewebe zeigten sich aber deutliche Unterschiede: So erneuern sich Haare und der Fettanteil (Lipide) in Knochen laufend, weshalb der Anteil des ^{14}C -Isotops im eingebauten Kohlenstoff weitgehend dem der Atmosphäre entspricht. ^{14}C -Werte von Knochenkollagen Erwachsener ergeben hingegen auf Grund der geringeren Erneuerungsraten einen scheinbar weiter zurückliegenden Todeszeitpunkt. Diesen Unterschied kann man aber nutzen, um zu klären, ob ein Individuum zur Zeit des ansteigenden oder abfallenden Bereichs des Bombenpeaks starb, denn das Knochenkollagen muss immer älter erscheinen als Lipide oder Haare.

Doch gilt es auch, alle Umstände zu bedenken: Vor Kurzem zeigte eine amerikanisch-belgische Arbeitsgruppe, dass kosmetische Produkte wie Färbemittel das Ergebnis vor allem bei Kopfharen verfälschen können, da sie in deren Struktur eindringen und zusätzlichen Kohlenstoff einlagern, der vor der Analyse mit speziellen chemischen Verfahren entfernt werden muss; Fingernägel erscheinen daher als bessere Wahl.

Gewebe mit vernachlässigbarer Erneuerung wie der Zahnschmelz eignen sich, um das Geburtsjahr eines Individuums zu ermitteln. Da die Komponenten des Gebisses in bestimmten Lebensaltern angelegt werden, genügen zwei Zahnschmelzproben, um zu entscheiden, ob der ansteigende oder der abfallende Ast des Bombenpeaks zum Vergleich der ^{14}C -

Werte herangezogen werden muss. Das Geburtsjahr des Individuums ergibt sich dann aus dem Alter des Zahnschmelzes und dem Lebensalter, zu dem der Zahn angelegt wurde. Wenn der Sterbezeitpunkt bekannt ist, lässt sich auch das Alter des Individuums berechnen. Laut einer dänischen Studie liefert die Augenlinse ähnliche Ergebnisse, da Strukturproteine des Linsenkerns – so genannte Kristalline – überwiegend bis zum ersten Lebensjahr gebildet und nicht mehr erneuert werden. Allerdings können in diesem Fall die Bestimmungen nur in einem knappen Zeitraum von etwa drei Tagen nach dem Tod durchgeführt werden, da die Augenlinse rasch abgebaut wird.

Artenschutz dank Datierung

Die Radiokohlenstoffmethode kann auch helfen, die Einhaltung des Washingtoner Artenschutzabkommens zu kontrollieren. Zum Beispiel ist der Handel mit Elfenbein aus der Zeit des Bombenpeaks stark eingeschränkt. Eine ^{14}C -Analyse kann falsch deklariertes Elfenbein entlarven.

Ohnehin ist das Aufdecken von Fälschungen eine viel versprechende Anwendung. Erst 2014 hat eine interdisziplinäre Studie für Aufsehen gesorgt, die italienische Wissenschaftler gemeinsam mit der Solomon R. Guggenheim Foundation in New York auf diesem Gebiet durchführten. Es bestand schon länger der Verdacht, dass ein Gemälde der Peggy-Guggenheim-Sammlung in Venedig nicht, wie behauptet, zur Reihe »Contraste de formes« von Fernand Léger (1881–1955) gehört. Experten hatten Abweichungen in der verwendeten Leinwand und den Farben ausgemacht. Nun ergab eine ^{14}C -Datierung der Leinwand, dass die dafür verarbeiteten Baumwollpflanzen 1959 oder 1962 geerntet worden waren – also mehrere Jahre nach Légers Tod.

Mag die Verwendung des ^{14}C -Bombenpeaks in der Forensik auf der Hand liegen, überraschen andere Anwendungen. So bewiesen Molekularbiologen des Karolinska Instituts in Stockholm, dass die Großhirnrinde des Menschen nach der Geburt keine neuen Nervenzellen (Neurone) mehr produziert. Dazu bestimmten sie mit Hilfe des Bombenpeaks das Alter der DNA in den Zellen entsprechender Gewebeproben. Weil die Erbsubstanz nach der letzten Zellteilung nicht mehr umgebaut wird, entspricht der Radiokohlenstoffanteil darin dem zeitgleichen Gehalt in der Atmosphäre. Der resultierende Kalenderzeitbereich kann mit dem bekannten Geburtsdatum des Individuums verglichen werden. Besonders eindeutig wäre eine Neubildung nachzuweisen, wenn die Geburt vor 1950 erfolgte, weil die DNA danach entstandener Zellen einen höheren Radiokohlenstoffanteil haben müsste. Allerdings konnten die schwedischen Forscher in einer Arbeit, an der auch unsere Gruppe beteiligt war, keine Neubildung von Neuronen im Riechzentrum nachweisen. Dagegen wurde eine Neubildung von Neuronen im Hippocampus – einem zentralen Teil des menschlichen Gehirns – gefunden.

Die schwedische Forschergruppe hat inzwischen weitere Organe untersucht. Kardiomyozyten (Herzmuskelzellen) erneuern sich bei einem 25-jährigen Individuum mit einer

Rate von einem Prozent pro Jahr und bei einem 75-jährigen zu 0,45 Prozent pro Jahr. Ein weiterer Befund auf Grundlage des Bombenpeaks ist, dass etwa ein Zehntel der Fettzellen bei Erwachsenen unabhängig vom Alter und vom Körpergewicht jährlich erneuert werden.

Immer neue Anwendungsideen kommen auf. So ist Kohlendioxid in Wasser gut löslich, weshalb man anhand von ^{14}C -Bestimmungen Austauschprozesse zwischen Atmosphäre und Ozean ebenso untersuchen kann wie das Auffüllen von Grundwassersystemen durch Niederschläge. Oft sind diese Untersuchungen aufwändig – Forscher der US-amerikanischen Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) haben zehntausende ^{14}C -Messungen durchgeführt, um den CO_2 -Transport in den Weltmeeren bis in tiefe Schichten zu verfolgen. Oft bedarf es auch trickreicher Umwege. Australische Wissenschaftler analysierten zum Beispiel ^{14}C in Tropfsteinablagerungen, um daraus auf die Füllraten eines Trinkwasserversorgungssystems bei Sydney zu schließen. Eine wichtige Erkenntnis war hier, dass das Auffüllen des Grundwassersystems nur wenige Jahre in Anspruch nimmt. Schließlich enthüllt der Bombenpeak sogar Neues über aquatische Lebewesen: Eine ebenfalls am WHOI durchgeführte ^{14}C -Datierung von Wirbelknochen weißer Haie aus dem Nordwestatlantik stellt die sonst übliche Altersbestimmung über Wachstumsbänder in diesen Knochen bei zwei Individuen in Frage: Statt 33 Jahre war das eine Exemplar 40 Jahre alt, das zweite 73 Jahre statt nur 50. Das wenig rühmliche Kapitel der Kernwaffentests hat also der Wissenschaft eine Fülle von Möglichkeiten zur Altersbestimmung eröffnet. ~

DIE AUTOREN



Eva Maria Wild und **Walter Kutschera** sind Professoren an der Fakultät für Physik der Universität Wien und arbeiten auf dem Gebiet der Isotopenforschung am Vienna Environmental Research Accelerator (VERA). Walter Kutschera hat

das VERA-Laboratorium begründet, Eva Maria Wild leitet das ^{14}C -Programm des Labors. Beide sind seit vielen Jahren auf dem Gebiet der ^{14}C -Altersbestimmung mittels Beschleunigermassenspektrometrie tätig und haben an verschiedenen Projekten zur Anwendung der » ^{14}C -Bombenpeak«-Datierung mitgewirkt.

QUELLEN

- Caforio L. et al.:** Discovering Forgeries of Modern Art by the ^{14}C Bomb Peak. In: The European Physical Journal Plus 129:6, 2014
Levin, I., Hesshaimer, V.: Radiocarbon – a Unique Tracer of Global Carbon Cycle Dynamics. In: Radiocarbon 42, S. 69–80, 2000
Spalding, K. L.: Retrospective Birth Dating of Cells in Humans. In: Cell 122, S. 133–143, 2005
Spalding, K. L. et al.: Forensics: Age Written in Teeth by Nuclear Tests. In: Nature 437, S. 333–334, 2005
Wild, E. et al.: ^{14}C Dating with the Bomb Peak: An Application to Forensic Medicine. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 172, S. 944–950, 2000

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1382046

Fluss vor dem Umbruch

Am Rio Xingu, einem Nebenfluss des Amazonas in Brasilien, entsteht ein höchst umstrittener Megastaudamm. Er wird ein einmaliges Ökosystem einschneidend verändern.

Von Mark Sabaj Pérez

Das sollten doch unschlagbare Argumente für den Schutz eines Flusses sein: Stromschnellen mit ungewöhnlich klarem Wasser, ein kaum erforschtes Zusammenspiel jahreszeitlicher Pegelschwankungen mit dem umgebenden Regenwald und eine unvergleichliche Vielfalt oft einzigartiger Organismen entlang eines hunderte Kilometer langen Flusslaufs. Und trotzdem siegten die Bestrebungen der brasilianischen Regierung, den Rio Xingu zu bändigen und für die Wasserkraft zu nutzen.

Jahrelang wurde praktisch rund um die Uhr an dem gigantischen Staudammprojekt Belo Monte gebaut. Es hätte bereits 2015 abgeschlossen sein sollen. Allerdings untersagte die brasilianische Umweltbehörde Ibama im September 2015 die Flutung des geplanten Stausees, da nicht alle Auflagen erfüllt waren. Dadurch verzögerte sich die Inbetriebnahme – doch auch erbitterte Proteste von Ureinwohnern und Umweltschützern konnten sie nicht verhindern. Im November 2015 gab die Behörde schließlich ihre Zustimmung. Der Stausee kann nun volllaufen.

Das Wasserkraftwerk am drittgrößten Nebenfluss des Amazonas soll eine Spitzenkapazität von mehr als 11 000 Megawatt erreichen, weltweit übertroffen nur noch von der Drei-Schluchten-Talsperre (22 500 Megawatt) in China, dem binationalen Kraftwerk Itaipú zwischen Brasilien und Paraguay und dem chinesischen Xiluodu-Staudamm (beide etwa 14 000 Megawatt).

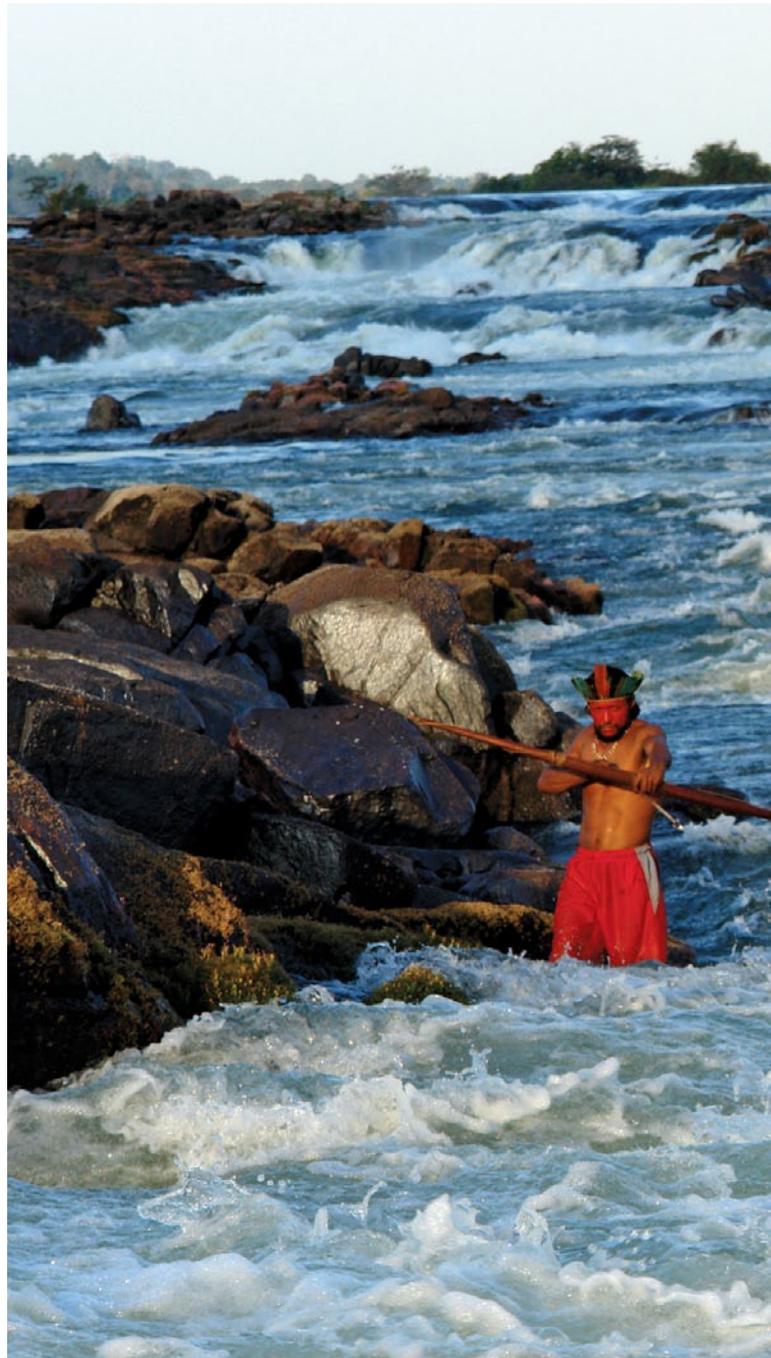
AUF EINEN BLICK

OHNE RÜCKSICHT AUF VERLUSTE

1 Am drittgrößten **Nebenfluss des Amazonas** wird ein gigantisches **Wasserkraftwerk** gebaut, das zu den größten der Welt zählen wird.

2 Forscher befürchten **katastrophale Folgen** für die Tierwelt. Um die tatsächlichen Auswirkungen später dokumentieren zu können, hat ein Team von Biologen vor Fertigstellung der Talsperre **die Artenvielfalt und die Ökologie der Region** detailliert erfasst.

3 Das Bauwerk dürfte das **komplexe Ökosystem** radikal verändern. Vor allem hoch angepasste Fischarten könnten ganz verschwinden.



MIT FRIEDLICHEN VON VERENA GLASS: XINGU/IVIVO

Die klaren Stromschnellen des Xingu beherbergen zahlreiche Fischarten und sind Fanggründe für mehrere indigene Völker. Der Mann vom Stamm der Juruna im Bild demonstriert die Jagd mit Pfeil und Bogen.



MIT FOT. GEN. VON VERENA GLASS / XINGU VIVO

Belo Monte wird den Xingu und seine Umgebung über mindestens 170 Flusskilometer hinweg radikal verändern. Fast die Hälfte dieser Strecke wird überflutet, der Rest ausgetrocknet. Die Fischarten, die sich an die Stromschnellen mit klarem Wasser angepasst haben, werden seltener vorkommen oder sogar ganz verschwinden. Nicht so eindeutig ist das Schicksal der Fische, die den Bereich unterhalb des geplanten Stausees bewohnen, zwischen dem gewaltigen Damm Pimental und dem Kraftwerk Belo Monte (siehe die Karten unten). Dort trifft das umgeleitete Wasser wieder auf das alte Flussbett. Was hier mit der Tier- und Pflanzenwelt geschieht, wird weitgehend davon abhängen, wie viel Wasser sich unterhalb von Pimental noch frei ausbreiten darf.

Damit sich die Folgen des Belo-Monte-Projekts für die Umwelt ermitteln lassen, mussten rechtzeitig vor Fertigstellung der Talsperre umfassende Informationen über die

örtliche Artenvielfalt und Ökologie vorliegen. Um eine solche Vergleichsbasis zu erstellen, haben sich US-amerikanische Wissenschaftler, darunter auch ich, brasilianischen Forschern im Rahmen des Projekts »iXingu« angeschlossen.

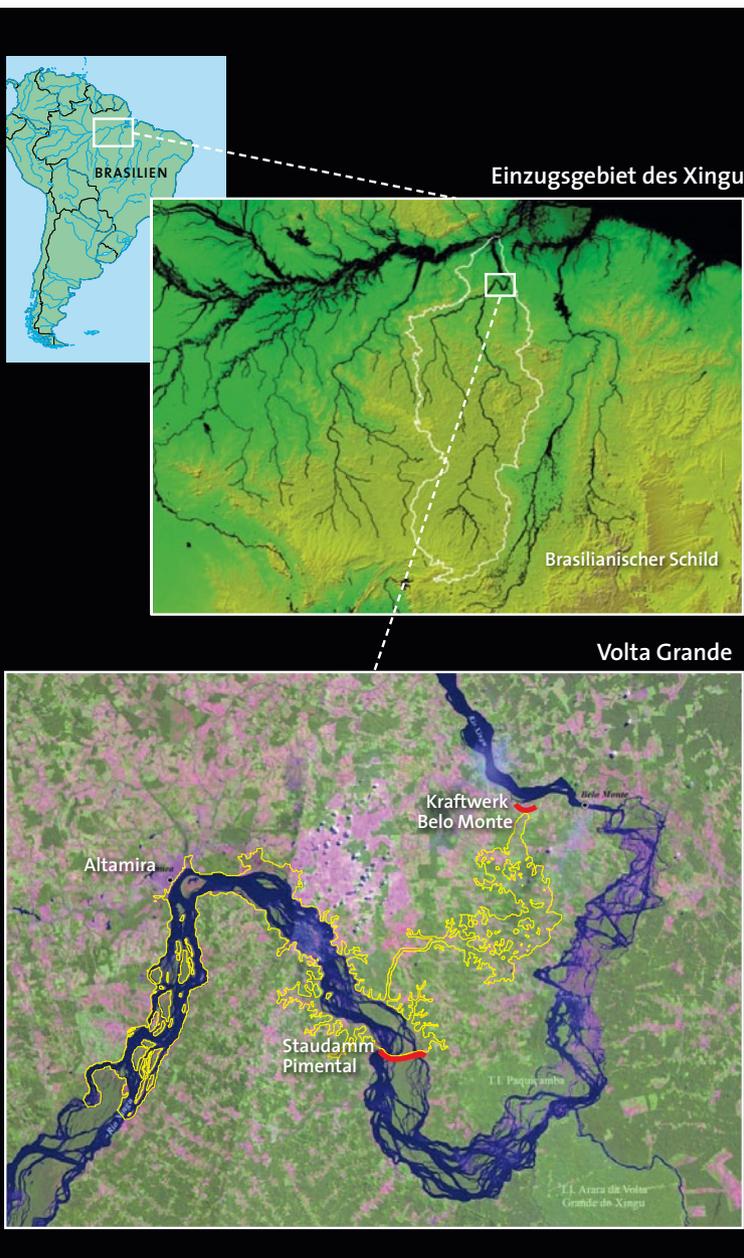
Vom Erfolg berauscht

Mein Kollege Philip Fearnside zitierte einmal einen der Talsperrenbauer, die hier zu Lande »barrageiros« genannt werden: »Gott erschafft so einen Ort nur selten. Er wurde für eine Talsperre gemacht.« Diese Aussage spiegelt die Einstellung eines Teils der brasilianischen Gesellschaft wider, der gigantische Kraftwerksträume verwirklichen möchte. In den 1980er Jahren konnten die »barrageiros« mit zwei bedeutenden Megatalsperren auftrumpfen: Itaipú, eine der größten Ingenieurleistungen des 20. Jahrhunderts, und Tucuruí am Rio Tocantins. Der brasilianische Energieversorger Eletrobrás erstellte daraufhin – zunächst im Geheimen – einen großwahnsinnig anmutenden Plan zur Stromerzeugung mit 297 neuen Talsperren in ganz Brasilien, die in den folgenden Jahrzehnten gebaut werden sollten, davon 79 im Amazonasbecken, darunter fünf am Rio Xingu. Schätzungsweise zehn Millionen Hektar Land, was drei Prozent der Urwaldfläche Amazoniens entspricht, hätten geflutet werden sollen.

Diese Pläne wurden 1987 öffentlich. Besonders die potenziellen biologischen und kulturellen Folgen für den Xingu lösten heftige Auseinandersetzungen aus. Damit begann auch der Streit um Belo Monte. An der Seite der Ingenieure warben Politiker öffentlich für das Projekt. Es sei unverzichtbar für die Energiesicherheit und den wirtschaftlichen Fortschritt. Dagegen bildete sich ein breites Bündnis aus indigenen Gemeinschaften, Basisbewegungen, Wissenschaftlern und Nichtregierungsorganisationen. Es erreichte, dass viele der Pläne lange Zeit in den Schubladen blieben.

Das änderte sich 2001, als die brasilianische Regierung auf einen großflächigen Stromausfall zunächst mit Stromrationierungen reagierte. Ein Teil der Ursachen waren eine anhaltende Dürre und daraus resultierende leere Stauseen. Diese Krise hielt neun Monate an und machte die Pläne für das strategisch wichtigste der neuen Wasserkraftvorhaben wieder aktuell, das Projekt Belo Monte. Seither schreitet es hartnäckigen und lautstarken Protesten zum Trotz stetig voran.

Währenddessen haben die Forscher des iXingu-Projekts bei mehreren Expeditionen zahlreiche Daten gesammelt und viele Arten dokumentiert. In Kombination mit offiziell-



AMERICAN SCIENTIST

Der Rio Xingu in Brasilien hat ein Einzugsgebiet von rund 500 000 Quadratkilometern. In einem etwa 130 Kilometer langen Abschnitt, der Volta Grande (untere Karte), ändert sich der Lauf mehrere Male um etwa 90 Grad. Eine Serie von Dammbauwerken zwischen den großen Staumauern Pimental und Belo Monte wird weite Teile der Schleife vom Wasser abschneiden und andere Bereiche des Flusses aufstauen (gelb umrandete Flächen), um ein Laufwasserkraftwerk zu versorgen.



MIT FRDL. GEN. VON VERENACIASS / XINGUWVO



MIT FRDL. GEN. VON AMAZON WATCH / SPECTRAL Q

Indigene Gemeinschaften protestierten immer wieder gemeinsam mit Naturschützern gegen die Staudämme (links). 2012 etwa besetzten 300 Menschen eine Baustelle und durchbrachen symbolisch den dortigen Erdwall (rechts).

len brasilianischen Untersuchungen liefern sie eine wertvolle Momentaufnahme der Fauna und Ökologie des mittleren und unteren Xingu. Nur so wird es möglich sein, die bevorstehenden Auswirkungen von Belo Monte einzuschätzen – und zu retten, was vom Fluss übrig bleibt.

Meine erste Begegnung mit dem Xingu hatte ich 2007 während einer Expedition zu seinem Nebenfluss Curuá. Auf der Reise erlebte ich zugleich hautnah, wie drastisch sich ein Talsperrenbau auf Stromschnellen und das Leben darin auswirkt. Am Tag unserer Ankunft hatten die »barrageiros« gerade den gesamten Fluss umgeleitet, um sein Bett für den Bau einer Staumauer trocken zu legen. Stehende Schlammwassertümpel hielten zehntausende Fische gefangen, die den Curuá oberhalb eines kleinen Wasserfalls bewohnt hatten. Solche Habitats sind wegen der starken Strömungen normalerweise schwierig zu beproben. Der Anblick dieser Szenerie bedrückte mich nicht nur, sondern machte mir darüber hinaus klar, wie dicht besiedelt solche Lebensräume sein können und wie wenig wir letztlich über tropische Stromschnellen wissen.

Nach dem Baubeginn von Belo Monte 2011 stieß ich einen gemeinschaftlichen Forschungsantrag an. Wir wollten die US-amerikanische National Science Foundation bewegen, eine Bestandsaufnahme der Artenvielfalt in den Stromschnellen des Xingu zu finanzieren – der Start des iXingu-Projekts. Sobald es 2013 bewilligt wurde, fand sich ein Team von erfahrenen Wasserbiologen und Studenten aus den Vereinigten Staaten und Brasilien zusammen.

Wir konzentrierten uns auf einen besonderen Abschnitt des Xingu, die Volta Grande (Große Schleife). Auf einer Strecke von 130 Kilometern überwindet der Fluss einen Höhenunterschied von 90 Metern und verändert seinen Lauf in drei größeren Kurven um jeweils etwa 90 Grad. Am Ufer der ersten Schlinge liegt die Stadt Altamira. Dort stoppt eine Schwelle aus Basaltgestein den nördlichen Kurs des Xingu und lenkt ihn Richtung Südosten um. Zunächst fließt er hier noch in einem einzigen, zwei Kilometer breiten Bett. Bald zerfasert er jedoch in viele Flussarme, die locker über unzählige Inseln

MARK SARAU PEREZ, XINGU PROJECT (NSF DEB-157873)



Viele Welsarten sind nur im Gebiet des Xingu heimisch. Mit dem Fang bestreiten Fischer ihren Lebensunterhalt. Sie jagen auch bei Aquarianern begehrte, farbenprächtige Exemplare.



BEDE FOTOS: MARK SABA / PÉREZ, MINICU PROJECT (NSF/DB-123783)

Die Pegelstände im Xingu schwanken saisonal stark. Oft sinkt das Wasser in der Trockenperiode um mehrere Meter, und das Flusssystem zerfällt in viele kleinere Kanäle, Teiche und Seen.

und Sandbänke verflochten sind. Am Südrand der Schlaufe wird der Lauf des Xingu erneut umgelenkt, diesmal durch die nordwestliche Grenze des Três-Palmeiras-Grünsteingürtels, und biegt in Richtung Nordosten ab.

Dieser untere Abschnitt der Volta Grande unterscheidet sich auffallend vom flussaufwärts gelegenen Teil. Wiederum ist der Grundriss extrem verflochten, doch die Arme winden sich hier noch ausgeprägter und bilden oft lineare Kanäle, wo das Wasser Bruchstellen im Untergrundgestein folgt. Einige Teile fließen im rechten Winkel zum Gesamtverlauf des Flusses, und viele werden durch scharf abknickende Schlingen zur Hauptfließrichtung zurückgeführt. Das Ergebnis ist ein kompliziertes Labyrinth von Kanälen, gewaltigen Stromschnellen und niedrigen Wasserfällen, die sich an Granitoberflächen bilden.

Am Ende der Volta Grande vereinen sich drei größere Arme zu einem Flussbett, das an seiner schmalsten Stelle etwa einen halben Kilometer breit und beachtliche 80 Meter tief ist. Hier erweitert sich der Xingu allmählich zu einem Trichter, während er durch paläozoische bis kreidezeitliche Sedimentgesteine zu seiner Mündung in den Amazonas fließt. Felsige, durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten gekennzeichnete Habitate gibt es auch in dieser so genannten Xingu Ria, jedoch eher verstreut und in großen Wassertiefen.

Belo Monte wird ein Laufwasserkraftwerk mit zwei größeren Talsperren. Die obere, Pimental, blockiert den stromaufwärts gelegenen Abschnitt der Volta Grande. Sie wird eine Fläche von etwa 400 Quadratkilometern auf einem 80 Kilometer langen Abschnitt des Xingu überschwemmen und seine Vielfalt an Armen und Stromschnellen auf einen Stausee reduzieren. Gleich oberhalb des Damms Pimental wird ein großer, künstlich angelegter Kanal das Wasser in ein mehr als 100 Quadratkilometer großes Reservoir leiten. Durch dieses dann geflutete Gebiet fließen derzeit noch vier Bäche. Das

Wasser aus dem Bereich wird die 20 Turbinen im Belo Monte-Kraftwerk antreiben, bevor es wieder in den alten Lauf des Xingu gelangt. Ein System von Dammbauwerken wird es daran hindern, in die niedriger gelegenen Abschnitte der Volta Grande zu entweichen. So schließt der gesamte Komplex den natürlichen Lauf des Wassers in einem Bereich von zwei Dritteln der Volta Grande kurz und dämpft die extreme Saisonalität ihres Abflussregimes.

Stromschnellen treten in vielen großen Flüssen auf, erreichen aber selten eine solche Mächtigkeit und Komplexität wie in der Volta Grande. Hinzu kommt die spezielle Hydrologie des Xingu. Mit einem Einzugsgebiet von näherungsweise 500 000 Quadratkilometern, was fast der anderthalbfachen Fläche Deutschlands entspricht, ist er der größte Klarwasser-Nebenfluss des Amazonas. Während der Niedrigwasserperiode von August bis November kann die Sichtweite unter der Oberfläche mehr als 2,5 Meter betragen, verglichen mit 0,3 bis 0,5 Metern im mit Schwebstoffen beladenen Amazonas.

Das Wasser des Xingu ist so durchsichtig, weil sich sein Einzugsgebiet auf den Brasilianischen Schild beschränkt. Verwitterung über Hunderte von Jahrillionen hinweg hat hier die weichen Sedimente ausgewaschen und das kristalline Grundgestein frei gelegt. Der Xingu befördert eine erhebliche Menge groben Sand vor allem aus der Erosion von Sandstein und Schiefer in seinem Oberlauf – eine gewaltige Schleifmaschine, in der das Material, das in den reißenden Stromschnellen ständig herumgewirbelt wird, das Gestein glatt poliert. In Form von Stränden und Sandbänken lagert es sich zwischen den felsigen Bereichen ab.

Die Pimental-Staumauer wird einen großen Teil des oberen Areals der Volta Grande von einem freien Fließgewässer in ein stilles Ablagerungssystem verwandeln. Das Flussbett im Stausee wird dann nicht mehr felsig sein, sondern es werden sich Sand, Lehm und Schlamm sammeln, bis ähnliche

Umweltbedingungen wie in der flussabwärts gelegenen Xingu Ria herrschen. Unterhalb des Staudamms Pimental wird der verminderte Wassernachschub die möglichen Lebensräume und Wanderrouten für strömungsliebende Fische ausdünnen.

Ein Fluss der Extreme

Weitere Nebenflüsse, die den Brasilianischen Schild in Richtung Volta Grande entwässern, ähneln dem Xingu hinsichtlich Temperatur, pH-Wert und Durchsichtigkeit. Einige Eigenschaften weichen hingegen ab, etwa der Sauerstoffgehalt oder die gelösten Ionen. Andere sind saure Schwarzwasserflüsse – dunkel gefärbt wie Tee durch Tannine, die aus verrottem Pflanzenmaterial ausgewaschen werden.

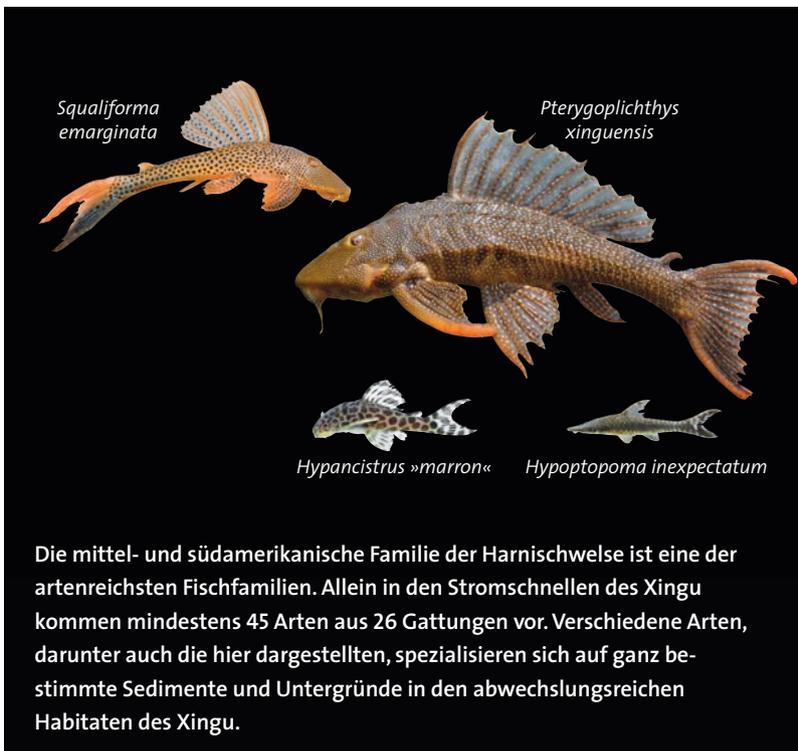
Alles in allem ergibt sich daraus eine jahreszeitlich sehr wechselhafte Wasserchemie, die zu der gesamten Komplexität des Ökosystems beiträgt. Das extreme Abflussverhalten des Xingu macht die Situation sogar noch komplizierter. In der Hochwasserzeit von Februar bis Mai ziehen an Altamira mehr als 32000 Kubikmeter pro Sekunde vorbei. Hingegen werden im September und Oktober maximal 500 Kubikmeter erreicht. Auch der Hochwasserstand selbst ist äußerst variabel: In einem mittleren trockenen Jahr fließt ein Drittel der Menge, die ein mittleres feuchtes Jahr bringt. Im trockensten Monat beträgt das Volumen, das die Volta Grande mit sich führt, nur etwa vier bis sieben Prozent der Hochwasserspitze. Dadurch fällt der Wasserstand um fünf Meter, und Flussarme, Tümpel und Seen werden vom Hauptstrom isoliert.

Zeitweise von der Pufferkapazität des Xingu abgeschnitten, klaffen die Eigenschaften des Wassers in diesen Lebensräumen weit auseinander. Stehende Tümpel erwärmen sich und verarmen an Sauerstoff. In größeren Seen steigt der Sauerstoffgehalt auf Grund von Phytoplanktonblüten. Das Hauptflussbett selbst ist stärker aufgegliedert und ähnelt eher vielen kleineren Bächen und Rinnsalen. Umgekehrt homogenisiert sich die Wasserchemie des gesamten Systems in der Hochwasserperiode, wenn sich zuvor isolierte Lebensräume wieder mit dem Hauptstrom verbinden.

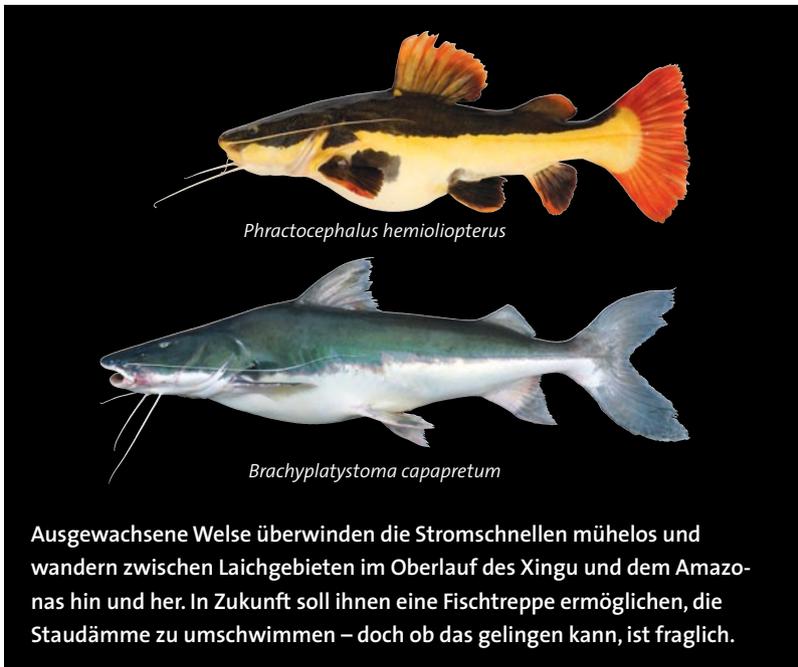
Nach Inbetriebnahme von Belo Monte werden die Ingenieure den Abfluss des Xingu kontrollieren und Hoch- sowie Niedrigwasserspitzen ausgleichen, um die Generatoren möglichst effizient auszulasten. Die einschneidend und dauerhaft gedämpften Pegelschwankungen des Xingu werden periphere aquatische Habitate endgültig vom Hauptstrom isolieren, was sie für viele Arten unbewohnbar macht. Außerdem sind die jährlichen Wechsel wahrscheinlich ausschlaggebend für die biologische Produktivität des Ökosystems. Die resultierende Reaktion der tierischen Bewohner der Volta Grande auf die neuen Umweltbedingungen bei verändertem Abflussregime ist der Ausgang eines großen Experiments, das kein Biologe freiwillig durchführen würde – denn es könnte katastrophale Auswirkungen haben.

Das komplexe Zusammenspiel von Geomorphologie, chemischer Zusammensetzung und Abflussverhalten bot

MARK SABAU FÉREZ, XINGU PROJECT (JAN-DEZ-13/14)



MARK SABAU FÉREZ, XINGU PROJECT (JAN-DEZ-13/14)



Raum für zahlreiche hochgradig angepasste Arten. So findet sich hier ein Ensemble von mehr als 450 Fischarten aus 48 Familien. Die Stars unter ihnen sind Angehörige der in Süd- und Zentralamerika beheimateten Familie der Harnischwelse (Loricariidae, siehe Bilder ganz oben auf dieser Seite). Ihre eindrucksvolle Vielfalt und Häufigkeit in der Volta Grande ist unübertroffen. Alle dieser auch Plecos genannten Fische sind am Bauch abgeflacht und besitzen erweiterte, zu einem tellerförmigen Saugnapf verschmolzene Lippen – Anpassungen an ein Leben am Boden. Leandro Sousa, Fisch-



Der Bau des Kraftwerks Belo Monte und des riesigen Staudamms Pimental (hier im Bild) sind weit vorangeschritten. In einer Studie für das Fachjournal »Science« untersuchten die Autoren um Kirk Winemiller aus Texas Talsperrenprojekte in den Gebieten des Amazonas, des Kongo und des Mekong. Das Fazit: Ökologische Langzeitfolgen werden bei den Planungen oft nur unzureichend berücksichtigt.

kundler an der Universidade Federal do Pará in Altamira, hat in den Stromschnellen des Xingu mindestens 45 Arten aus 26 Gattungen dokumentiert. Gestützt auf seine Arbeit mit Fischern, die sich auf Zierfische spezialisiert haben, vermutet er, dass die Lebensabläufe der Plecos fein auf die unterschiedlichen Habitate im Xingu eingestellt sind. Verschiedene Arten und Altersgruppen besetzen bestimmte Nischen, die sich durch Tiefe, Fließgeschwindigkeit und Untergrund unterscheiden.

Aquarien zur Arterhaltung?

Die meisten Plecos des Xingu sind in seinem Flussbecken endemisch, zwei sogar ausschließlich in der Volta Grande: *Hypancistrus zebra* und ein taxonomisch namenloser Verwandter. Ersterer wurde erst in den 1980er Jahren entdeckt, ist wegen seiner schwarzen und weißen Streifen unter dem Namen Zebrawels bekannt und bei Aquarianern seither äußerst geschätzt. Fans dieser Art zahlen hohe Summen für ein Brutpaar aus Wildfang. Zwar bleiben die Profite größtenteils bei Zwischenhändlern hängen, dennoch sichern viele Fischer in Altamira ihren bescheidenen Unterhalt mit dem Fang von Zebrawelsen und anderen Plecos aus dem Xingu. Belo Monte wird deren natürlichen Lebensraum vernichten.

Bald dürften die Bestände in der Gefangenschaft von Zoogeschäften und Liebhabern die wild lebenden übertreffen.

Plecos teilen sich den Flussgrund mit Süßwasserstechrochen aus der Familie der Potamotrygonidae. Letztere weisen typische Verteilungsmuster im unteren Xingu auf, die sich auch bei vielen anderen Fischgruppen finden sowie bei einigen wirbellosen Wasserbewohnern. Das erste Muster zeigt sich bei Generalisten, etwa dem Gemeinen Süßwasserrochen (*Potamotrygon orbignyi*). Sie sind durchgehend in einem Großteil des Xingubeckens und im Amazonas verbreitet. Andere, etwa der Pfauenaugen-Stechrochen (*Potamotrygon motoro*), beschränken sich auf Tieflandhabitate unterhalb der Volta-Grande-Stromschnellen. Umgekehrt markiert die Volta Grande die stromabwärtige Grenze vieler rheophiler (strömungsliebender) und lithophiler (steinigen Grund besiedelnder) Arten wie dem Leopoldstrochen (*Potamotrygon leopoldi*). Zuletzt kommt es bei vielen Spezies aus der Volta Grande noch vor, dass stromabwärts ein im Amazonasbecken weiter verbreiteter Verwandter ihre Nischen besetzt.

Die Vielfalt im Tiefland nimmt zur Mündung des Xingu hin zu, insbesondere von Arten, die weiter verbreitet sind oder sich an das von den Nebenflüssen gelieferte Schwarzwasser angepasst haben. Der untere Teil der Volta Grande mit seinen rasch fließenden, schmalen Armen, kräftigen Stromschnellen und niedrigen Wasserfällen fungiert als Barriere für die Fauna, indem er die stromaufwärtige Wanderung vieler Tieflandfische und anderer Wasserorganismen behindert. Arten, die unterhalb der Volta Grande fehlen, entwickelten sich wahrscheinlich auf dem Brasilianischen Schild, wo felsige Stromschnellen den Xingu prägen. Ihre Abwesenheit im Tiefland mag auf den Mangel an geeigneten Habitaten oder auf einen Zufall in der Geschichte des Einzugsgebiets zurückzuführen sein. Beispielsweise werden die engsten Verwandten einiger Fische des Xingu in den felsigen Teilen benachbarter Flussbecken gefunden.

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



www.spektrum.de/t/regenwald



Verteilungen verwandter Arten über heutige Wasserscheiden hinweg deuten auf Verbindungen zwischen Flusseinzugsgebieten in der Vergangenheit hin. Biogeografie und Flussgeometrie lassen etwa vermuten, dass Teile der Flüsse Tapajós, Xingu und Tocantins zu einem alten, vom damaligen Amazonas unabhängigen Flusssystem auf dem brasilianischen Schild gehörten. Mit der Zeit wurde es aufgelöst, indem das Amazonasbecken die Unterläufe einfiel. Obwohl hypothetisch, könnte ein solches Szenario auch den abrupten Übergang der Tierwelt zwischen der Volta Grande und dem Xingu-Tiefland erklären. Der Staudamm Pimental wird die Teile des Systems noch stärker voneinander trennen. Insbesondere dürfte das weit verbreitete Generalisten treffen sowie migratorische Arten, die mit den Jahreszeiten durch die Volta Grande wandern.

Gegen den Strom

Langstreckenzieher unter den Fischen trotzen den Lebensraumgrenzen. Ein brasilianisches Forscherteam unter der Leitung der Biologin Lisiane Hahn zeichnet mittels Telemetrie die Migrationsbewegungen von Fischen auf einem 700 Kilometer langen Abschnitt des Xingu auf. Die vorläufigen Daten legen nahe, dass Rotflossen-Antennenwelse (*Phractocephalus hemiliopterus*, siehe Bild S. 71) und Netzspatelwelse (*Pseudoplatystoma reticulatum*) während der Hochwasserperiode zu entfernten Habitaten im Oberlauf wandern, vermutlich zum Laichen, und dass die Volta Grande keine nennenswerte Barriere dafür darstellt. Ein abenteuerlustiger Rotflossen-Antennenwels überwand eine Strecke von mindestens 329 Kilometern und verließ dann den von den Empfangsgeräten der Studie abgedeckten Bereich.

Die Ingenieure bauen eine 1,2 Kilometer lange Fischtreppe, um den Tieren zu helfen, den Staudamm zu umgehen. Doch es ist höchst fraglich, wie wirksam diese Maßnahme ist. So locken zum Beispiel die vielen wandernden Exemplare in der engen Passage Beutegreifer an, von denen einige sich dort sogar ansiedeln.

Im Verlauf unserer eigenen Arbeiten fingen wir während der Hochwasserperiode einen erwachsenen Großwels im Rio Iriri nahe seiner Mündung in den Xingu oberhalb der Volta Grande. Sieben Großwelsarten sind in den südamerikanischen Flüssen östlich der Anden endemisch. Die Jungfische entwickeln sich im Unterlauf des Amazonas und in dessen Mündung ins Meer. Erwachsene Tiere, deren Länge zwischen einem halben und mehreren Metern variiert, wandern über lange Strecken in den oberen Amazonas und steigen große Nebenflüsse hinauf, um in den Ausläufern der Anden zu laichen. Lange war es fraglich, ob adulte Riesenwelse in den Xingu und seine wichtigsten Nebenflüsse ziehen. Unser Fang zeigte aber: Die Stromschnellen der Volta Grande sind kein Hindernis für solche großen und kräftigen Schwimmer. Nicht erwiesen ist hingegen, ob Riesenwelse auch eine relativ schmale und lange Fischtreppe überwinden können.

Trotz solcher baulichen Hilfen, Zuchtprogrammen in Gefangenschaft und anderen Bemühungen zur Schadensbe-

grenzung wird Belo Monte verheerende Folgen für die Volta Grande haben. Um sich die Auswirkungen einer Staumauer klarzumachen, schauen die Menschen oft vor allem auf das Verschwinden von Tieren. Diese Sichtweise ist auch berechtigt, wenn das betroffene Gebiet die einzige oder letzte verbliebene Population einer Spezies beherbergt. Doch im Fall von Belo Monte verblasst der Verlust von einigen Arten mit eng definiertem Verbreitungsgebiet im Vergleich zum Zusammenbruch des gesamten Systems.

Denn wir verlieren nicht nur Einträge auf einer Landkarte, die in biologischen Bestandsaufnahmen für Lebewesen verzeichnet werden. Wir verlieren vor allem die ausgedehnten Stromschnellen, tiefen Flussarme, stark verflochtenen Wasserläufe und variablen Pegelstände, die zu der außergewöhnlichen physikalisch-chemischen und saisonalen Komplexität des Xingu beitragen. Wir verlieren die Elastizität eines Systems, das zentrale Voraussetzung für Biodiversität und Evolution in großen Stromschnellen gewesen ist. Das ist besonders traurig, da das einzige Klarwassersystem Südamerikas, das noch größer ist als das des Xingu, der Rio Tocantins, bereits 1984 aufgestaut wurde.

Wir haben uns bemüht, die Komplexität des Rio Xingu zu dokumentieren und damit eine wissenschaftliche Basis für künftige Studien über die Auswirkungen von Belo Monte zu schaffen. Jede neue Generation wächst in einer Welt auf, die stärker technisiert und biologisch weniger vielfältig ist. Deshalb verlieren die Menschen immer mehr das Gefühl dafür, wie reich die Erde sein kann. Es fällt mir schwer, mir einen größeren Verlust für die wenigen verbliebenen großen Stromschnellen vorzustellen. Hoffentlich wird unsere Arbeit zumindest die Erinnerung an den natürlichen Zustand der Volta Grande erhalten und als Grundlage für weitere Debatten über zukünftige Megatalsperren dienen. Solange Menschen glauben, Flüsse wären für Staudämme gemacht und nicht für die Biodiversität, werden »barrageiros« sie sicherlich bauen. ~

DER AUTOR



Mark Sabaj Pérez ist Ichthyologe an der Academy of Natural Sciences der Drexel University in Philadelphia. Auf dem Foto zeigt er einen Harnischwels aus dem Rio Xingu.

QUELLEN

Sawakuchi, A. O. et al.: The Volta Grande do Xingu: Reconstruction of Past Environments and Forecasting of Future Scenarios of a Unique Amazonian Fluvial Landscape. In: *Scientific Drilling* 20, S. 21–32, 2015

Winemiller, K. O. et al.: Balancing Hydropower and Biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. In: *Science* 351, S. 128–129, 2016

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1396797

© American Scientist

Die Geheimtinten der CIA

Fast ein Jahrhundert hielt der US-Geheimdienst eine Sammlung von Rezepten unter Verschluss, mit denen sich unsichtbare Nachrichten verfassen und vom Empfänger sichtbar machen lassen. Darunter finden sich neben vielen altbekannten auch einige ziemlich ausgefallene Methoden.

VON MATTHIAS DUCCI UND MARCO OETKEN

Im April 2011 gab der US-Geheimdienst, die Central Intelligence Agency (CIA), sechs Dokumente für die Öffentlichkeit frei, die jahrzehntelang als geheim und seit Ende der 1970er Jahre immerhin noch als vertraulich eingestuft waren. Darin stehen unter anderem zahlreiche Rezepturen für Geheimtinten und ihre Entwicklerlösungen aus der Zeit des Ersten Weltkriegs.

Die späte Veröffentlichung nach fast einem Jahrhundert sorgte für Spott in der Presse, da die Rezepturen in dieser Form wohl schon seit Langem nicht mehr im Nachrichtendienst eingesetzt werden. Es mude doch recht seltsam an, dass derlei Material fast 100 Jahre als geheim eingestuft worden sei, wo doch jedes aufgeweckte Kind, das gängige Kriminalgeschichten gelesen hat, sich mit etwas Zitronensaft an unsichtbarer Tinte versuchen könne, schrieb etwa die »Washington Post«. Ins gleiche Horn blies der Nachrichtensender N24: »Wie man Geheimtinte herstellt, stand bereits mehrfach in der Micky Maus.«

Dem Stempel auf einem der Dokumente ist gleichwohl zu entnehmen, dass noch Anfang 1978 entschieden

wurde, es von der automatischen Offenlegung auszunehmen. Eine erneute Prüfung sollte erst 2020 erfolgen.

Mehr als 2000 Jahre alt

Rezepte für Geheimtinten gab es schon vor über 2000 Jahren. Eines steht zum Beispiel in den Schriften des Philon von Byzanz, eines griechischen Erfinders, Konstrukteurs und Autors. Die verborgene Nachricht wird dabei mit farblosem Gallapfelextrakt geschrieben. Der Empfänger kann sie dann mit Eisen-salzen sichtbar machen, weil Eisen(III)-Ionen mit Gallussäure eine tiefschwarze Komplexverbindung bilden.

Im Jahr 50 n. Chr. erwähnte Plinius der Ältere eine Geheimtinte aus dem Saft der auch als Wolfsmilch bezeichneten Euphorbie. Die Schrift ist nicht mehr zu erkennen, wenn der Milchsafte trocknet, und kommt erst beim Erhitzen des Pergaments wieder zum Vorschein. Mit solchen blassen Tinten, die erst in der Wärme einen kräftigen Farbton annehmen, wurden vom 17. bis zum 19. Jahrhundert gerne geheime Liebesbriefe verfasst. Dass sie zum Bekunden verborgener Zuneigung dien-

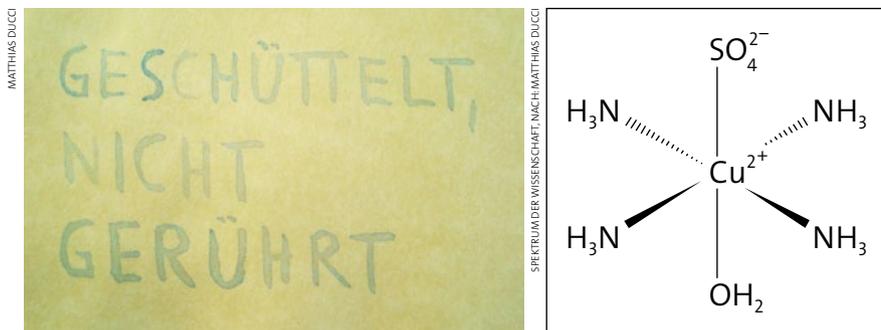
ten, trug ihnen den Beinamen »sympathetisch« ein.

Auch das Ministerium für Staatssicherheit der DDR befasste sich noch bis in die 1980er Jahre mit Geheimtinten. In der Abteilung Operativ-Technischer Sektor (OTS) entwickelten Chemiker immer neue Rezepturen. Das Sortiment war schließlich so umfangreich, dass ab 1987 eine elektronische Datenbank dafür aufgebaut wurde.

Selbst heute finden Geheimtinten gelegentlich noch Verwendung. So berichtet der bis 1995 für den britischen Geheimdienst MI6 arbeitende Agent Richard Tomlinson in seinem 2001 publizierten Enthüllungsbuch über einen zur Ausrüstung gehörenden Stift zum Verfassen unsichtbarer Botschaften. Und 2008 wurde ein mutmaßliches Al-Kaida-Mitglied in England verhaftet, das ein Buch mit verdächtigen Telefonnummern mit sich führte, welche mit Geheimtinte notiert waren. Außerdem schreiben Häftlinge in Gefängnissen mitunter Nachrichten mit Urin. Pikanterweise handelt es sich dabei ebenfalls um eine sympathetische Tinte.

Kurioses aus dem Agentenleben

Abgesehen von den Rezepturen für Geheimtinten und ihre Entwicklerlösungen ermöglichen die CIA-Dokumente auch faszinierende bis kuriose Einblicke in die einstige Agententätigkeit. So enthalten sie allerlei Tipps für den Spionagealltag, indem sie zum Beispiel verraten, wie ein Brief vom Adressaten unbemerkt geöffnet und wieder verschlossen werden kann. Generell suspect seien frisch gestrichene Metallwände etwa auf Schiffen, da sich unter der Farbe eine geheime Botschaft verbergen könne. Einen derartigen Ver-



Mit Ammoniakdämpfen sichtbar gemachter Geheimtintertext aus Kupfersulfatlösung (links). Das Ammoniak verwandelt das blassblaue Kupfersulfat-Pentahydrat in das tiefblaue Tetraamminkupfersulfat-Monohydrat (rechts).

dacht solle man mit Hilfe von Terpen-
tin überprüfen.

Ferner enthalten die CIA-Dokumen-
te Ratschläge, wie sich eine Geheim-
tinte, in diesem Fall eine Stärkelösung,
unbemerkt mitführen lasse. Demnach
könne man zum Beispiel ein Taschen-
tuch damit tränken und es dann trocken
lassen. Das gelte es später nur wie-
der zu befeuchten.

Eines der CIA-Dokumente richtet
sich an US-amerikanische Postinspek-
toren. Dort heißt es: »Es gibt eine Reihe
weiterer Methoden, die Spione und
Schmuggler je nach Geschick und Aus-
bildung einsetzen – etwa Texte unter
Briefmarken schreiben, Botschaften in
Medikamentenkapseln verpacken und
Nachrichten oder Zeugnisse auf Zehen-
nägel gravieren, wo sie später mit Ruß
sichtbar gemacht werden.«

Ausgewählte Rezepte im Praxistest

Zum Teil führen die CIA-Dokumente
recht triviale Geheimtinten auf, so
den schon erwähnten Zitronensaft. Um
damit geschriebene Texte sichtbar zu
machen, wird empfohlen, mit einem
heißen Bügeleisen darüberzufahren.

Andere Rezepturen beinhalten Che-
mikalien, von denen erhebliche gesund-
heitliche Risiken ausgehen, so dass
heutzutage nur fachlich geschultes Per-
sonal unter Laborbedingungen damit
hantieren darf. Ein Beispiel ist eine Pla-
tinchloridlösung, die mit Quecksilber-
dämpfen entwickelt wird. Zahlreiche
Vorschriften sehen sogar vor, die ver-
borgene Schrift mit Schwefelwasser-
stoff zum Vorschein zu bringen, jenem
berüchtigten, stark giftigen Gas, das
penetrant nach faulen Eiern riecht und
früher in Stinkbomben enthalten war.
Deshalb steht in den Dokumenten auch
immer wieder, man solle die Dämpfe
nicht einatmen.

Insgesamt enthalten die Unterlagen
etwa 50 Rezepturen für Geheimtinten
und ihre Entwicklerlösungen. Hiervon
haben wir drei recht harmlose aus-
gewählt, die sich mit allgemein verfügbaren
Chemikalien, vor allem Haushalts-
produkten, nachvollziehen lassen. Ein
weitaus größeres Sortiment bieten zwei



Eine lugolische Lösung bringt zum Vorschein, was zuvor mit einer
Geheimtinte aus Stärkelösung geschrieben wurde.

Veröffentlichungen, die in den Quellen
am Schluss aufgeführt sind (Ducci &
Krahl, 2013) und (Ducci, 2014). Für die
dort beschriebenen Rezepte benötigt
man allerdings teilweise Schulchemi-
kalien.

Obwohl wir die nachfolgenden Ver-
suche sorgfältig erarbeitet haben, über-
nehmen der Verlag und wir als Autoren
keine Haftung für die Richtigkeit der
Angaben, Hinweise und Ratschläge so-
wie für eventuelle Druckfehler. Jeder
Experimentator ist selbst gehalten, sich
über das Gefährdungspotenzial der
verwendeten Stoffe zu informieren,
mit entsprechender Vorsicht vorzuge-
hen und am Ende alle Substanzen ord-
nungsgemäß zu entsorgen.

Die erste von uns herausgegriffene
Geheimtinte der CIA-Dokumente ist
eine stark verdünnte Kupfersulfatlö-
sung. Sie sei, heißt es dort, mit einem
weichen Zahnstocher aufzutragen und
werde später mit konzentrierten Am-
moniakdämpfen entwickelt, welche die
unsichtbare Schrift blau erscheinen lie-
ßen. Wir haben dieses Rezept für den
Hausgebrauch etwas abgewandelt. Be-
nötigt werden ein feiner Pinsel, gelb-
liches oder hellbraunes Papier, ein Rea-
genzglas, ein Teelicht und ein kleines
Glasgefäß – etwa ein 50-Milliliter-Be-
cherglas – sowie als Chemikalien Hirsch-
hornsalz und Kupfersulfat-Pentahydrat
($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), das im Fachhandel für
Poolbedarf erhältlich ist.

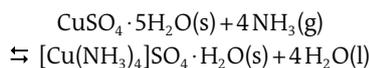
In dem Glasgefäß löst man 1,5
Gramm der Kupferverbindung in 100

Milliliter Wasser. Der Pinsel dient dazu,
mit dieser Lösung auf dem Papier zu
schreiben. Am besten taucht man ihn
nach jedem Buchstaben erneut ein.
Nach dem Trocknen ist die Schrift nicht
mehr mit dem Auge wahrnehmbar. We-
gen der gelbbraunlichen Tönung des
Papiers gilt das selbst dann, wenn man
es gegen eine Lichtquelle hält. Bei weißem
Schreib- und Kopierpapier würde sich
die Schrift dagegen schattenhaft ab-
zeichnen.

Als Nächstes füllt man das Reagenz-
glas etwa zwei Zentimeter hoch mit
dem Hirschhornsalz und erhitzt es von
außen mit dem brennenden Teelicht.
Dabei passiert dasselbe wie beim Bak-
cken: Das Hirschhornsalz, das che-
misch überwiegend aus Ammonium-
hydrogencarbonat besteht, zerfällt und
setzt Kohlendioxid und Ammoniak
frei. Hält man nun das Papier mit der
beschrifteten Seite direkt über die Rea-
genzglasöffnung, erscheinen die Zei-
chen in Blau (Bild links).

Chemisch lassen sich die Beobach-
tungen leicht erklären. Die Konzentra-
tion der Kupfersulfatlösung ist so ge-
ring, dass die blassblaue Farbe des ent-
haltenen Tetraaquakupfer-Komplexes
nach dem Auftragen auf dem Papier op-
tisch nicht erkennbar ist. Dasselbe gilt
für das Kupfersulfat-Pentahydrat nach
dem Trocknen. Mit den Ammoniak-
molekülen bildet sich dagegen gemäß
der folgenden Gleichung, in der *s* für
fest (englisch: solid), *l* für flüssig (liquid)
und *g* für gasförmig steht, ein Tetra-

amminkupfer-Komplex, genauer: das Tetraamminkupfersulfat-Monohydrat.



Diese tiefblaue Verbindung erscheint selbst in geringer Konzentration noch farbig.

Unsere zweite Geheimtinte bezieht sich auf eine Stelle im selben CIA-Dokument, wo es heißt: »Stärkeschrift auf Leinen wird nach dem Trocknen durch eine Lösung von Kaliumiodid sichtbar gemacht. Sie färbt sich dabei blau. Die Farbe verschwindet wieder, wenn man das Papier mit einer sehr schwachen Lösung von Natriumhyposulfat behandelt.« Diese Beschreibung ist interessanterweise fehlerhaft. Hält man sich streng daran, erscheint keine blaue Schrift; denn statt der Kaliumiodid- muss eine Iod-Kaliumiodid-Lösung verwendet werden! Außerdem heißt Natriumhyposulfat heutzutage Natriumthiosulfat.

Diesmal brauchen wir außer dem Pinsel ein zweites Becherglas sowie ein kleines Leinentuch, einen Fön, Wattepads und Speisestärke. Die Iod-Kaliumiodid-Lösung gibt es als lugolsche Lösung in der Apotheke zu kaufen. Dort erhalten Sie auch Fixiersalz, das aus Natriumthiosulfat-Pentahydrat besteht.

Für den Versuch lösen wir 0,1 Gramm Speisestärke in einem Becherglas unter Rühren in zehn Milliliter Wasser und Erwärmen auf etwa 60 Grad Celsius. Wir benutzen erneut den Pinsel, um mit der



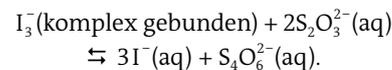
Eine Geheimtinte aus Ammoniumalaunlösung und Knoblauchsaff färbt sich beim Erhitzen mit einem Teelicht braunschwarz.

Lösung auf das Leinentuch zu schreiben. Dieses trocknen wir anschließend mit dem Fön. Da die Stärke farblos ist, lässt sich die Schrift nicht erkennen.

Nun geben wir im zweiten Becherglas etwa fünf Tropfen der lugolschen Lösung in zehn Milliliter Wasser, tauchen ein Wattepad hinein und tupfen damit das Leinentuch ab. Daraufhin erscheint die zunächst unsichtbare Schrift in blauen Zeichen (Bild auf S. 75). Das liegt an der Bildung eines entsprechend farbigen Iod-Stärke-Komplexes. Dabei lagern sich Polyiodidketten (I_3^- , I_5^- , I_7^- , I_9^-) in den kanalartigen Hohlraum der schraubenförmigen Helix ein, zu der die kettenartigen Amylosemoleküle in der Stärke gewunden sind.

Wie im CIA-Dokument beschrieben, kann man die Schrift auch wieder verschwinden lassen. Dazu lösen wir 0,5 Gramm Fixiersalz in zehn Milliliter Wasser und tupfen mit dieser Lösung die blaue Schrift ab. Das Natriumthiosulfat-Pentahydrat zerstört den Iod-

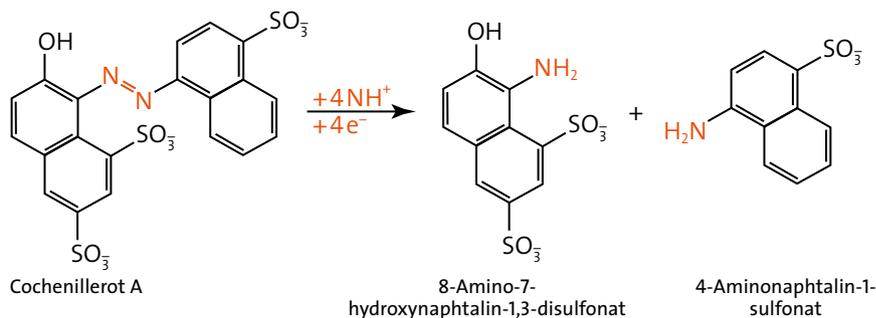
Stärke-Komplex, indem es das Iod zum Iodid reduziert, während es selbst zu Natriumtetrathionat reagiert. Die Reaktionsgleichung lautet:



Das Kürzel »aq« (von englisch: aqueous) bedeutet »in Wasser gelöst«.

Die Chemie hinter diesen beiden Geheimtinten ist seit Langem bekannt, und deshalb verwundert es doch sehr, dass die CIA noch bis in unser Jahrhundert hinein glaubte, die Rezepte quasi als Staatsgeheimnisse hüten zu müssen. Vergleichsweise ungewöhnlich nimmt sich dagegen das dritte Beispiel aus, das wir hier vorstellen wollen. In den Dokumenten taucht es überraschenderweise als »deutsche Formel« auf, ohne dass klar wäre, worauf diese Bezeichnung beruht.

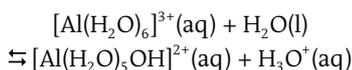
Für das Rezept brauchen wir außer den schon bekannten Utensilien eine Knoblauchzehe und einen gewöhnlichen Kristalldeostick, der chemisch aus Ammoniumalaun $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ besteht. Von ihm schaben wir etwa 0,5 Gramm ab und lösen sie in zehn Milliliter Wasser. Dann zerquetschen wir die Knoblauchzehe mit einer Knoblauchpresse und schlämmen den Brei mit etwas Wasser auf. Einen Milliliter dieses Safts mischen wir mit dem gleichen Volumen der Alaunlösung. Fertig ist die Geheimtinte, mit der wir wieder mittels Pinsel einen Text auf bräunliches



Die »Saubär«-Badewasserfarbe Rot enthält den Farbstoff Cochenillerot A, den das Natriumdithionit im Power-Entfärber der Firma Heitmann gemäß der rechts gezeigten Reaktionsgleichung in gelbliche aromatische Amine spaltet. Weil eines der beiden Spaltprodukte (4-Aminonaphthalin-1-sulfonat) bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht fluoresziert, kann die resultierende Lösung als Geheimtinte dienen.

Papier malen. Nach dem Trocknen ist er unsichtbar. Erwärmt man das Papier jedoch über einem Teelicht, erscheint nach etwa einer halben Minute eine braunschwarze Schrift (Bild links oben).

Die Verfärbung rührt vor allem von Zersetzungsprodukten des Papiers her, die sich in der Wärme an den zuvor benetzten Stellen bilden, weil hier die Zellulose von der sauren Geheimtintenlösung teilweise gespalten – chemisch: hydrolysiert – wurde. Die Aluminiumionen wirken nämlich gemäß der Gleichung



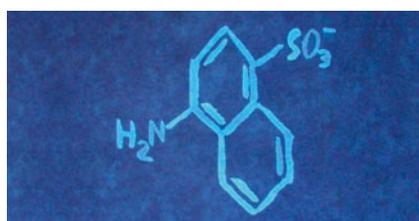
als Kationensäure. Außerdem tragen braune Zersetzungsprodukte des Knoblauchsafte zur Verfärbung bei.

Beide Flüssigkeiten können auch jede für sich als sympathetische Geheimtinte dienen. Dabei zeigt die Alaunlösung nach dem Trocknen und Erwärmen einen wesentlich intensiveren Effekt als der Knoblauchsafte, der nur eine schwach braune Verfärbung des Papiers bewirkt.

Nur unter UV-Licht sichtbar

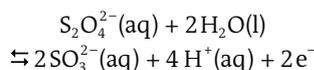
Unter Schülern erfreuen sich neuerdings Geheimstifte großer Beliebtheit, die von zahlreichen Firmen angeboten werden. Mit ihnen geschriebener Text ist unsichtbar und leuchtet nur bei Bestrahlung mit UV-Licht auf. Zu diesem Zweck ist meist eine Licht emittierende Diode (LED) am oberen Ende des Stifts angebracht. Der Grund für dessen Beliebtheit wird deutlich, wenn man die Produktbewertungen auf den einschlägigen Internetportalen liest. Da heißt es etwa: »Ideal zum Spicken, helles, aber unauffälliges Licht, so lassen sich ganz einfach Formeln und so weiter unsichtbar notieren. Echt zu empfehlen.«

Farblose Tinten, die beim Bestrahlen mit UV-Licht fluoreszieren, kann man aber auch selbst aus normalen Haushaltsprodukten herstellen. Hierzu lösen Sie eine halbe Tablette der Saubär-Bade-wasserfarbe, die in Drogeriemärkten erhältlich ist und den roten Azofarbstoff Cochenillerot A enthält, in 25 Milliliter Wasser. Anschließend fügen Sie einige Spatelspitzen Power-Entfärber »Inten-



Strukturformel von 4-Aminonaphthalin-1-sulfonat, geschrieben mit fluoreszierender Geheimtinte aus Haushaltsprodukten, die unter UV-Licht bläulich leuchtet.

siv« der Firma Heitmann hinzu, der bis zu 30 Prozent aus Natriumdithionit besteht. Da dieses Reduktionsmittel Cochenillerot A an der Azogruppe in aromatische Amine spaltet (Grafik links unten), schlägt die Farbe von Rot nach Gelb um. Die Dithionitionen werden dabei gemäß der Gleichung



zu Sulfitionen oxidiert.

Die resultierende Lösung lässt sich auf gelbem oder leicht braunem Papier, das allerdings keine Weißmacher enthalten darf, als Geheimtinte verwenden, weil eines der beiden Spaltprodukte, nämlich das 4-Aminonaphthalin-1-sulfonat, bläulich fluoresziert, wenn ultraviolettes Licht darauffällt (Bild oben). Idealerweise beleuchtet man die unsichtbare Botschaft in einem dunklen Raum mit einer UV-Handlampe. Diese darf nur äußerst wenig sichtbares Licht aussenden, um die Fluoreszenz nicht zu überstrahlen.

An Methoden zur Übermittlung von Nachrichten, die an James-Bond-Filme erinnern, wird auch heute durchaus noch vereinzelt geforscht. So berichteten Rafal Klajn und Kollegen von der Northwestern University in Evanston (Illinois) 2009 in der Zeitschrift »Angewandte Chemie« über die Entwicklung eines Verfahrens zum Verfassen geheimer Botschaften, die sich nach dem Sichtbarmachen von selbst wieder lösen. Träger der Nachricht sind auf Papier aufgebrachte Nanopartikel aus Gold oder Silber. Diese verklumpen bei Bestrahlung mit einem Stift, der UV-

Licht aussendet. Das Geschriebene kommt dadurch zum Vorschein. Mit der Zeit zerfallen die Klumpen, so dass die Schrift wieder verschwindet. Wie schnell das geschieht, hängt von der Intensität der UV-Bestrahlung ab, da diese über die Größe der gebildeten Aggregate entscheidet. Eine Rekonstruktion der Botschaft nach dem Zerfall sei ausgeschlossen, versichern die Entwickler des Verfahrens. ~

DIE AUTOREN



Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe sowie geschäftsführender Direktor des Chemielehrerfortbildungszentrums der Gesellschaft Deutscher Chemiker in Karlsruhe und Herausgeber der Zeitschrift »Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule«.

Marco Oetken ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg sowie Chefredakteur und Herausgeber der »Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule«. Die Forschungsschwerpunkte von beiden liegen in der Erschließung und Erprobung neuer Themenfelder für einen problemorientierten, alltagsbezogenen und zeitgemäßen Chemieunterricht.

QUELLEN

Ducci, M., Krahl, E.: A German Formula – Rezepte für Geheimtinten aus den Archiven der CIA. In: CHEMKON 20, S. 163–168, 2013

Ducci, M.: Historische Geheimtinten der CIA. In: Chemie & Schule 29(3), S. 11–15, 2014

Klajn, R. et al.: Writing Self-Erasing Images Using Metastable Nanoparticle »Inks«. In: Angewandte Chemie 121, S. 7169–7173, 2009

Macrakis, K.: Die Stasi-Geheimnisse. Herbig, München 2009

WEBLINKS

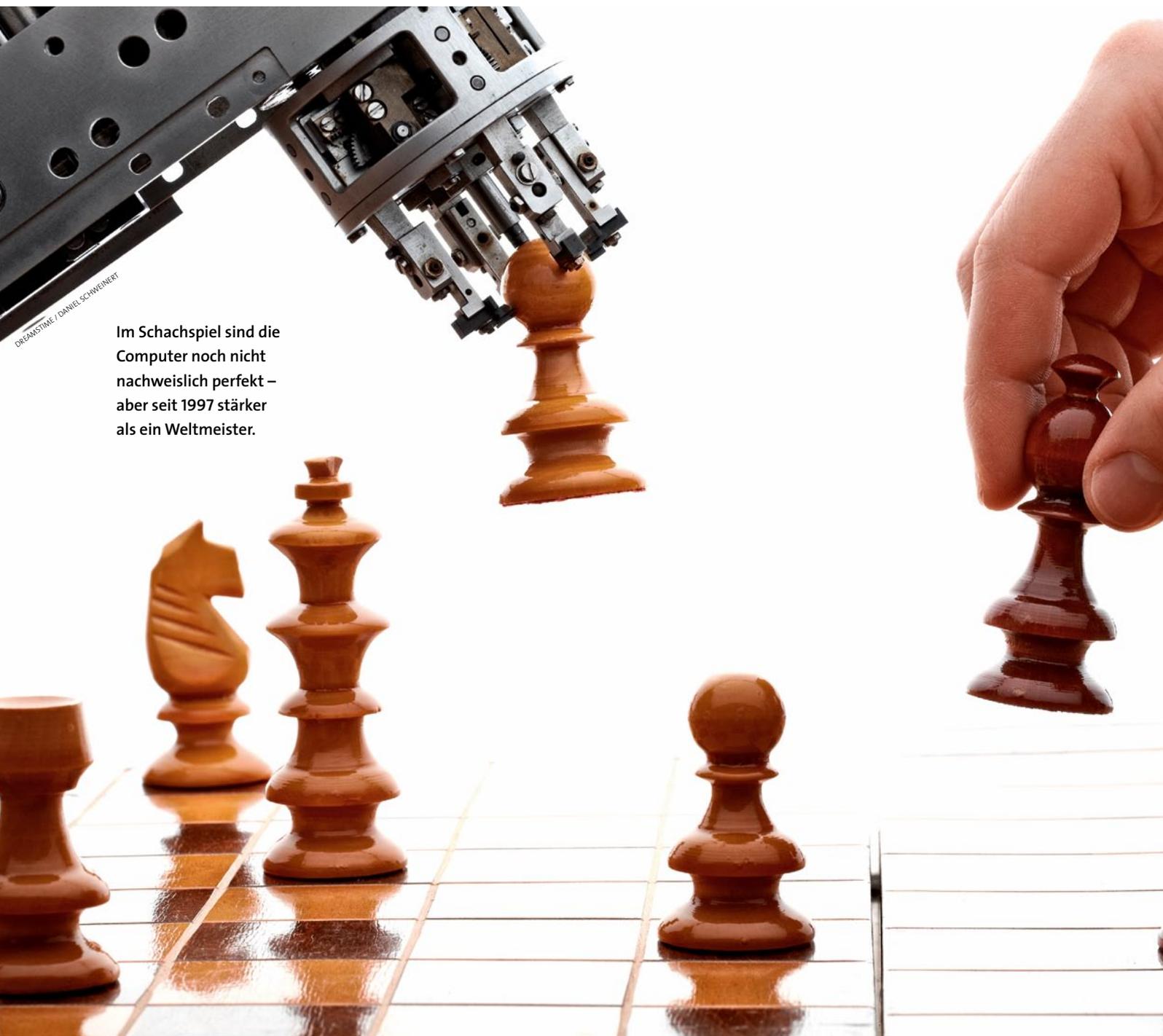
Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet: www.spektrum.de/artikel/1396788

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Intelligenz bei Mensch und Maschine

Manche Computer vollbringen zweifellos intelligente Leistungen – aber nur sehr spezielle und stets auf anderem Weg als der Mensch. Ein neuer theoretischer Ansatz zielt darauf ab, diese Kluft zu überbrücken.

Von Jean-Paul Delahaye



DREAMSTONE / DANIEL SCHWEINERT

Im Schachspiel sind die Computer noch nicht nachweislich perfekt – aber seit 1997 stärker als ein Weltmeister.

Was ist Intelligenz? Die Psychologen wissen schon lange, dass dieser zentrale Begriff ihrer Wissenschaft schwer zu fassen ist. Ihr bevorzugtes Mittel zu seiner Messung, der Intelligenztest, fragt nach einer theoretisch schlecht fundierten Mischung von Fähigkeiten. Der amerikanische Psychologe Howard Gardner ging in seinem Buch »Frames of Mind« von 1983 (deutsch: »Abschied vom IQ«) so weit zu behaupten, es gebe nicht eine einheitliche Intelligenz, sondern deren zahlreiche verschiedene. Die Idee schmeichelt unserem Ego, vor allem wenn wir uns nicht einer hohen Punktzahl auf der allgemeinen Intelligenzskala rühmen können: Je mehr Spezialintelligenzen es gibt, desto größer ist unsere Chance, wenig-

tens in einer von ihnen zu glänzen. Gleichwohl stieß Gardners Konzept in der Fachwelt auf heftigen Widerspruch.

Die Diskussion um das Wesen der Intelligenz erhält neue Nahrung, da in jüngster Zeit Maschinen Leistungen vollbringen, die bislang alle Welt ohne zu zögern als intelligent bezeichnet hätte. Als 1997 ein Programm auf dem Rechner »Deep Blue« den damaligen Schachweltmeister Garri Kasparow entthronte, galt das allgemein als epochales Ereignis. Damals wiesen einige Kommentatoren – quasi zum Trost – darauf hin, dass die Programme bei dem Brettspiel Go nur verblüffend mittelmäßige Leistungen zeigten. Aber inzwischen erreichen die Maschinen auch hier die Spielstärke sehr guter Amateure. Im März 2013 schlug das Programm »Crazy Stone« von Rémi Coulom, damals an der Université de Lille, den japanischen Profi Yoshio Ishida; dieser hatte zu Beginn der Partie dem Programm allerdings einen Vorteil von vier Steinen eingeräumt. Nach der japanischen Go-Klassifikation kommt »Crazy Stone« auf eine Spielstärke von »sechs Dan«. Weltweit gibt es weniger als 500 Spieler, die dieses Niveau erreichen. Und im Oktober 2015 gelang es einem von der Firma DeepMind entwickelten System, den amtierenden Go-Europameister zu schlagen (»AlphaGo, der neue Go-Meister«, S. 84).

Im Damespiel ist die künstliche Intelligenz (KI) mittlerweile unfehlbar. Seit 1994 ist es keinem Menschen gelungen, das kanadische Programm »Chinook« zu besiegen; man weiß seit 2007, dass dieses eine optimale, nicht weiter verbesserungsfähige Strategie verfolgt. Nach der Spieltheorie muss es eine solche Gewinnstrategie für alle Spiele dieser Klasse geben. Sie für Schach zu berechnen, scheint allerdings auf mehrere Jahrzehnte hinaus noch unmöglich zu sein.

Der Siegeszug der maschinellen Intelligenz beschränkt sich nicht auf Probleme, die eine klare mathematische Struktur aufweisen oder auf die Durchmusterung einer großen Zahl von Möglichkeiten hinauslaufen. Aber selbst im Bereich der Brettspiele mussten die Forscher erfahren, wie schwierig es ist, menschliche Denkprozesse nachzubilden: Die Programme für Dame, Schach und Go können es zwar mit den besten menschlichen Spielern aufnehmen, funktionieren jedoch ganz anders.

Das ist allerdings kein Anlass, ihnen die Intelligenz abzusprechen. Wenn die Maschinen schon unsere ureigensten Leistungen erbringen, wäre es unfair, auch noch zu verlangen, dass sie das auf unsere Weise tun – vor allem weil wir diese unsere Denkweise nicht einmal genau genug kennen. So ist es noch niemandem gelungen, die Spielweise eines Schachgroßmeisters in Form von Algorithmen zu beschreiben.

Computer am Steuer

Große Mengen von Informationen speichern, schnell und systematisch symbolische Daten wie etwa die Positionen von Bauern auf einem Schachbrett auswerten: Mit diesen Fähigkeiten können Maschinen zwar Schachweltmeister werden, aber noch lange nicht Auto fahren. Gleichwohl



WEGE ZUR UNIVERSELLEN INTELLIGENZ

1 Computer übertreffen Menschen nicht nur beim Zahlenrechnen und Datendurchsuchen, sondern auch beim **Schachspiel**, beim **Autofahren** und in einer **Quizshow**.

2 Sie erbringen diese Leistungen jedoch auf **völlig anderen Wegen** als ein Mensch und können daher auch keinen Aufschluss auf seine Denkweise liefern.

3 Ein neues Konzept setzt Intelligenz mit der Fähigkeit zur **Datenkompression** in Bezug. Dadurch soll die Definition von Eigenheiten des Menschen wie der Maschine unabhängig werden.

haben sie auch hier in letzter Zeit spektakuläre Erfolge vorzuweisen (Spektrum der Wissenschaft 12/2013, S. 88). Auf diesem Gebiet zeigt sich die Diskrepanz in den Vorgehensweisen besonders krass. Ein autonomes Auto »denkt« völlig anders als ein Mensch.

Für das herkömmliche Fahren müsste eine künstliche Intelligenz unterschiedliche und rasch wechselnde Bilder analysieren können: Wo ist der Rand dieser mit Laub bedeckten Straße? Ist der schwarze Fleck 50 Meter vor mir in der Mitte der Straße ein Schlagloch oder eine lumpige Pfütze? Eine so leistungsfähige Bildanalyse kann heute noch niemand programmieren. Daher setzen autonome Fahrzeuge ganz andere Mittel ein. Die Autos der Firma Google (Bild unten) bestimmen ihren Ort auf der Erdoberfläche mit einer hoch präzisen Version des Satellitenortungssystems GPS und verwenden »Karten«, die weit über das hinaus, was in einem Navi gespeichert ist, die Form und das Aussehen der Straßen sowie die Verkehrsschilder und weitere wichtige Orientierungspunkte der Umgebung anzeigen. Obendrein haben sie Radar an Bord, ein optisches System namens Lidar (light detection and ranging), das ein dreidimensionales Abbild der unmittelbaren Umgebung erzeugt, sowie Sensoren an den Rädern.

Da diese Fahrzeuge bereits mehrere zehntausend Kilometer unfallfrei gefahren sind, verfügen sie zweifelsfrei über

Intelligenz, auch wenn sie nicht fähig sind, auf die Zeichen eines Polizisten zu reagieren, gelegentlich vor einer Baustelle in abrupten Stillstand verfallen und aus Sicherheitsgründen nicht schneller als 40 Stundenkilometer fahren dürfen. Hinter einem Menschen am Steuer bleiben sie allerdings noch weit zurück. Der kann dank seiner Fähigkeit, aus Bildern Informationen zu entnehmen, und seiner universellen Intelligenz auch eine völlig unbekannte Strecke bewältigen – ohne Karten, Radar oder Lidar und ohne an einem unerwarteten Hindernis zu scheitern.

Roboter als Journalisten

Geraume Zeit hielt sich die Vorstellung, die – geschriebene oder gesprochene – natürliche Sprache biete Computern ein unüberwindliches Hindernis. Aber auch das ist inzwischen widerlegt. Maschinen erreichen beim Verstehen oder Erzeugen natürlichsprachiger Sätze geradezu beunruhigende Leistungen. So setzen manche Redaktionen, etwa bei der »Los Angeles Times«, bei »Forbes« und Associated Press, Roboterjournalisten ein. Bislang beschränken sich diese Programme darauf, Resultate aus dem Sport oder aus dem Wirtschaftsleben in kurze Artikel zu verwandeln – und stiften damit gelegentlich echten Nutzen.

Am 17. März 2014 gab es um 6.25 Uhr Ortszeit ein Erdbeben der Stärke 4,7 in Kalifornien. Drei Minuten später erschien auf der Internetseite der »Los Angeles Times« ein etwa 20 Zeilen langer Artikel mit Informationen zum Thema: Lage des Epizentrums, Stärke, Zeitpunkt, Vergleich mit Erdstößen aus der jüngeren Vergangenheit. Das verfassende Programm nutzte Rohdaten des Informationsdienstes U.S. Geological Survey Earthquake Notification Service; es stammt von Ken Schwencke, einem Journalisten, der auch programmiert. Nach seiner Aussage vernichten solche Methoden keine Arbeitsplätze, sondern machen im Gegenteil die Arbeit des Journalisten interessanter. In der Tat: Diese Umsetzung zahlenmäßiger Fakten in kurze Texte ist ein ziemlich langweiliger Job – und ein Mensch könnte ihn nicht besser erledigen.

Das autonome Auto der Firma Google verschafft sich einen Panoramablick mit Hilfe von Kameras auf dem Dach – eines von mehreren Mitteln, mit denen es seine im Vergleich zu Menschen schwachen Bildanalysefähigkeiten kompensiert.



GOOGLE

Intelligenztests, bei denen die Maschine gewinnt

Zweifellos sind die klassischen Tests in der Tradition des französischen Psychologen Alfred Binet (1857–1911) kein gutes Mittel, um die Intelligenz von Maschinen zu messen. In der Tat erreichen auch Programme, denen man beim besten Willen keine Intelligenz attestieren kann, darin ziemlich gute Ergebnisse.

So haben Pritika Sanghi und David Dowe 2003 ein Programm geschrieben, das in einer Vielzahl von Tests der unten dargestellten Art annähernd durchschnittliche Punktzahlen erreicht. Die recht einfach gestrickte Software beruht auf einigen Prinzipien, nach denen die Konstrukteure von Tests bevorzugt vorgehen. Ein perfektioniertes Programm würde vermutlich Intelligenzquotienten im Hochbegabtenbereich erzielen. Das beweist jedoch nicht, dass die Programme intelligent wären, sondern nur, dass sich die Tests nicht zur Messung der universellen Intelligenz eignen.

Bei einer bestimmten Art von Aufgaben schneiden die Maschinen übrigens deutlich besser ab als Menschen. Beispiel: Welches sind die nächsten drei Glieder dieser Folge: 3, 4, 6, 8, 12, 14, 18, 20, 24, 30, 32, 38, 42?

Vielleicht erkennen Sie, dass es sich um die Primzahlen plus eins handelt: $2+1, 3+1, 5+1, 7+1, \dots$. Demnach ist die Folge fortzusetzen durch $43+1, 47+1, 53+1$, also 44, 48, 54.

Ein Programm, das derartige Fragen perfekt und in Sekundenschnelle beantwortet, findet sich im Internet: die »Online Encyclopedia of Integer Sequences« (<https://oeis.org>) von Neil Sloane. Sie schlägt auch Antworten vor, auf die Sie nie gekommen wären. Für die oben genannte Folge bietet sie an zweiter Stelle an: Es handelt sich um diejenigen natürlichen Zahlen n mit der Eigenschaft, dass für alle zu n teilerfremden Zahlen k mit $k^2 < n$ die Zahl $n - k^2$ eine Primzahl ist. Nach dieser Logik wären die nächsten Folgenglieder 48, 54, 60. Natürlich würde ein Programm, das darauf ausgelegt ist, einen Intelligenztest zu bestehen, eine solch komplizierte Antwort nicht anbieten.

Das System ist einem Menschen haushoch überlegen. Überzeugen Sie sich selbst, indem Sie versuchen, diese Zahlenfolgen fortzusetzen:

- A. 11, 12, 14, 16, 20, 21, 23, 25, 29
- B. 11, 31, 71, 91, 32, 92, 13, 73
- C. 3, 7, 14, 23, 36, 49
- D. 1, 2, 4, 5, 10, 20, 29, 58, 116
- E. 1, 4, 5, 7, 8, 11, 13, 14, 16, 22, 25, 28, 31, 34

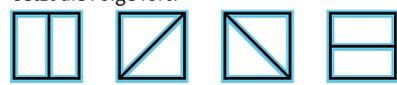
Die Antworten finden Sie am Ende des Kastens. OEIS findet sie augenblicklich, ebenso wie die Antworten auf noch viel

schwierigere Fragen. Dennoch erscheint es nicht vernünftig, dieses Programm als intelligent zu betrachten. Es beschränkt sich darauf, die vorgelegte Folge in einer Datenbank zu suchen, die über Jahre hinweg sorgfältig aufgebaut wurde. Zudem liefert es stets die einfachste Antwort zuerst. Der Erfolg des Programms beruht auf seinem gut gefüllten Speicher und seiner Fähigkeit, diesen schnell und fehlerfrei zu durchsuchen. Ein Mensch dagegen versucht, die Struktur der Folge durch Kopfrechnen und ähnliche Mittel zu entschlüsseln. Abermals beruht der – in diesem Fall spektakuläre – Erfolg des Programms darauf, dass es mit völlig anderen Methoden arbeitet als ein Mensch.

Betrachten Sie die Folge



Welche der folgenden Grafiken setzt die Folge fort?



Vervollständigen Sie die Tabelle

2	4	8
3	6	12
4	8	?

POUR L'ASCIENCE

Vor wenigen Jahren ist es gelungen, einen Computer zu programmieren, der in der Quiz-Fernsehsendung »Jeopardy!« mitspielen kann (Spektrum der Wissenschaft 10/2011, S. 97) – eine Aufgabe, die allem Anschein nach ein umfangreiches kulturelles Allgemeinwissen so-

wie die Beherrschung der natürlichen Sprache erfordert. »Jeopardy!« wurde 1962 erfunden und ist in den USA sehr populär; eine deutsche Version namens »Gefahr!« wurde von 1990 bis 2000 ausgestrahlt. Fragen aus Geografie, Literatur, Kunst, Sport und Naturwissenschaften sind in englischer Umgangssprache formuliert, was auch für die Antworten gelten soll. Bei einigen Phasen des Spiels kommt es auf die Schnelligkeit der Antworten an. Als das von IBM entwickelte Programm »Watson« im Februar 2011 gegen zwei sehr erfolgreiche menschliche Spieler antrat, bekam es die Fragen schriftlich vorgelegt und antwortete mit Hilfe einer künstlichen Stimme. »Watson« trug den Sieg davon und zeigte damit, dass weder die bei »Jeopardy!« üblichen, teilweise weit hergeholtten Wortspiele noch die Breite der unterschiedlichsten Wissensgebiete prinzipielle Hindernisse für die künstliche Intelligenz darstellen.

Heute dient »Watson« dazu, medizinische Expertensysteme zu entwickeln, die in der Ausbildung von Ärzten Verwendung finden.

- A. Alle natürlichen Zahlen ab 10, deren Quersumme eine Primzahl ist (nächste Folgenglieder 30, 32, 34);
- B. Primzahlen ab 10, mit umgekehrter Ziffernfolge notiert (14, 34, 74);
- C. Das n -te Folgenglied ist die Summe von n^2 und der n -ten Primzahl (66, 83, 104);
- D. Teiler von 580 (145, 290, 580);
- E. Diese Zahlen ergeben eine Primzahl, wenn man eine Zwei davor- und eine Eins dahinterschreibt (35, 37, 38).

Ebenfalls vom Computer erzeugt ist eine erstaunlich große Anzahl von Artikeln der freien Enzyklopädie Wikipedia. Der schwedische Physiker Lars Sverker Johansson hat ein Programm namens »Lsjbot« geschrieben, das täglich bis zu 10 000 Einträge produziert und es bislang auf mehr als zwei Millionen Stück gebracht hat, und zwar auf Schwedisch sowie in Cebuano und Wáray-Wáray, zwei auf den Philippinen gesprochenen Sprachen. »Lsjbot« setzt Informationen über Tiere oder Städte, die bereits digitalisiert in Datenbanken vorliegen, in das von Wikipedia vorgegebene Format um. Mitte 2013 waren knapp die Hälfte aller schwedischen Wikipedia-Artikel – im Wortsinn – maschinengeschrieben. Die niederländische Wikipedia wuchs durch computergenerierte Beiträge an Größe sogar über die deutsche hinaus.

Johansson hat für seine Aktion reichlich Lob wie Kritik geerntet. Seinen Artikeln mangle es an Kreativität, und ihre schiere Masse erzeuge ein Ungleichgewicht. Darauf entgegnet er, dass seine Werke – Kreativität hin oder her – gleichwohl nützlich seien, und die durch sie erzeugte Unausgewogenheit sei auch nicht schlimmer als das allgemein beklagte Übergewicht technischer Themen in der Wikipedia. In der Tat erscheint Johanssons Plan, für jede bekannte Tierart einen

Eintrag zu erzeugen, nicht unsinnig. Darüber hinaus plädiert er für eine breite Anwendung seines Programms. Gleichwohl brauche die Wikipedia Redakteure, die literarischer als »Lsjbot« schreiben und insbesondere Gefühle ausdrücken können, »wozu dieses Programm niemals fähig sein wird«.

Viel komplexer und eher der Bezeichnung »künstliche Intelligenz« würdig ist der Erfolg des Programms »Watson« der IBM in der Fernsehspielshow »Jeopardy!« (siehe »Intelligenztests, bei denen die Maschine gewinnt«, S. 81; siehe auch Spektrum der Wissenschaft 4/2011, S. 22, und 10/2011, S. 97).

Heutzutage nehmen es die Programme sogar beim Kreuzworträtsellösen mit den besten menschlichen Fachleuten auf. Man muss sich wohl endgültig von der Vorstellung verabschieden, die Sprache sei dem Menschen vorbehalten, auch wenn die automatische Übersetzung von einer Sprache in die andere zuweilen noch haarsträubenden Unfug liefert.

Einmal den Turing-Test bestehen!

Ebenso wie die Intelligenz entzieht sich der eng verwandte Begriff »Denkvermögen« jedem Versuch einer einfachen Definition. Um den zugehörigen Schwierigkeiten aus dem Weg zu gehen, schlug der Informatik-Pionier Alan Turing (1912–

Der Kompressionswettbewerb von Marcus Hutter

Intelligenz ist – zum Beispiel – das Vermögen, zu einer gegebenen Folge von Daten deren Fortsetzung mit höherer Trefferquote vorherzusagen als durch schlichtes Würfeln. Diese Fähigkeit ist, wie man zeigen kann, äquivalent zu der Fähigkeit, Daten zu komprimieren. Letztere wiederum gilt manchen Forschern, darunter Marcus Hutter, als Intelligenz schlechthin (»universelle Intelligenz«) – vorausgesetzt, die vorgelegten Daten sind hinreichend vielfältig.

Daher hat Hutter einen Wettbewerb in Datenkompression ins Leben gerufen. Jedermann kann sich daran beteiligen und das von Hutter selbst ausgesetzte Preisgeld von 50 000 Euro ganz oder teilweise gewinnen (<http://prize.hutter1.net>).

Die Aufgabe besteht darin, eine Datei mit 100 Millionen Schriftzeichen, die aus der Online-Enzyklopädie Wikipedia zusammengestellt wurde, mit Hilfe eines Programms auf möglichst wenige Zeichen zu komprimieren – verlustfrei wohlge-merkt: Ein mitzulieferndes Dekompressionsprogramm muss die Ausgangsdatei exakt wiederherstellen. Zu Beginn wurde die Datei mit Hilfe eines klassischen Kompressionsprogramms um etwa 81 Prozent auf 18 324 887 Schriftzeichen reduziert. Wer ein Programm einreicht, das die Rate des letzten Gewinners um N Prozent verbessert, erhält $(N/100)$ mal 50 000 Euro. Wenn Sie sich beispielsweise ein Programm ausdenken, das im Vergleich zum vorigen Siegerprogramm eine zusätzliche Kompression von 5 Prozent bringt, gewinnen Sie 2500 Euro. An die Größe des Kompressionsprogramms und an seine Laufzeit werden gewisse Bedingungen gestellt.



FOTOLIA / JÖNG LANTERNE

Diese Kompression reduziert zwar das Volumen erheblich, ist aber irreversibel und daher nicht zugelassen.

Der bislang letzte Sieger Alexander Rhatushnyak erreichte im Mai 2009 eine Kompression auf 15 949 688 Zeichen. Claude Shannon, der Begründer der theoretischen Informatik, schätzte, dass die natürliche Sprache etwa ein Bit Information pro Zeichen trägt. Demnach müsste die genannte Datei mit 12,5 Millionen Zeichen ausdrückbar sein; es gäbe also noch Spielraum – vielleicht sogar etwas mehr, wenn man unterstellt, dass die Wikipedia die Regelmäßigkeit unserer Welt widerspiegelt und ein Programm diese Regelmäßigkeit erfassen könnte.

1954) 1950 den fiktiven Test vor, der heute seinen Namen trägt (Spektrum der Wissenschaft 6/2012, S. 80).

Eine Reihe von Gutachtern führt dabei per Fernschreibleitung – heute wäre stattdessen zu sagen: über das Internet – mit einem unbekanntem System einen schriftlichen Dialog. Wenn die Experten nicht unterscheiden könnten, ob ihr Korrespondenzpartner ein Mensch oder eine Maschine ist, müsste man ihm Denkvermögen oder eben Intelligenz zuschreiben. Schließlich treffen wir das entsprechende Urteil bei einem echten Menschen auch ausschließlich auf Basis der Interaktion mit ihm.

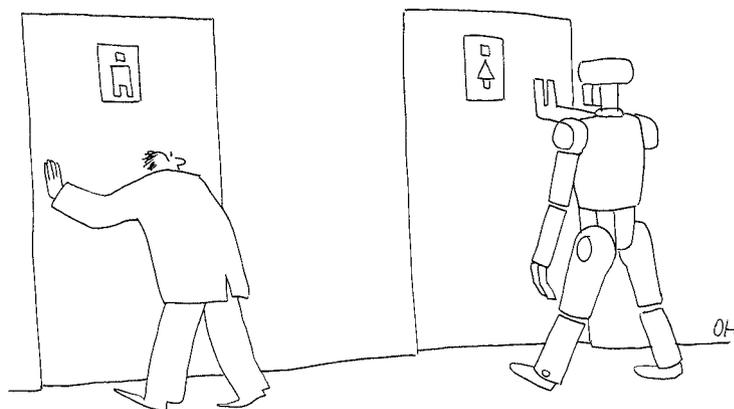
Konkret wäre Turings Gedankenexperiment etwa so zu gestalten: Man versammelt eine große Zahl von Experten und lässt sie so lange, wie sie wollen, mit einem Partner eine schriftliche Korrespondenz führen; dieser ist in der Hälfte der Fälle ein Mensch und in der anderen ein zu testendes informatives System *S*. Zu einem selbst gewählten Zeitpunkt gibt jeder Experte ein Urteil darüber ab, ob er es mit einem Menschen oder einer Maschine zu tun hatte. Ist die Trefferquote aller Experten zusammen nicht besser als der Zufall, also in der Größenordnung von 50 Prozent, so hat das System *S* den Turing-Test bestanden.

Der optimistische Turing sagte voraus, dass die KI bis zum Jahr 2000 einen Teilerfolg erreichen werde. Und zwar würden die Experten nach einem fünfminütigen Dialog in mindestens 30 Prozent der Fälle die Maschine für einen Menschen halten. Im Großen und Ganzen hat Turing Recht behalten: Seit einigen Jahren gibt es Programme, die diese abgeschwächte Form des Tests bestehen. Wann eines im »echten« Turing-Test erfolgreich sein wird, ist derzeit nicht abzusehen. Darüber hat auch Turing nichts gesagt.

Am 6. September 2011 fand im indischen Guwahati ein abgeschwächter Turing-Test mit dem Programm »Cleverbot« des britischen Informatikers Rollo Carpenter statt. 30 Schiedsrichter unterhielten sich vier Minuten lang mit einem unbekanntem Gesprächspartner. Am Ende schätzten die Schiedsrichter und das Publikum, das die Konversation auf Bildschirmen mitverfolgen konnte, mit 59,3 Prozent der 1334 abgegebenen Stimmen die Maschine als Mensch ein (und erkannten nur mit 63,3 Prozent den Menschen als solchen).

Bei einem ähnlichen Test aus Anlass von Turings 60. Todestag am 9. Juni 2014 in der Londoner Royal Society gelang es einem Programm namens »Eugene Goostman«, 10 der 30 versammelten Gutachter in die Irre zu führen (Spektrum der Wissenschaft 5/2015, S. 15). Da die Organisatoren der Veranstaltung eine recht einseitige Darstellung in die Welt setzten, bejubelte die Presse als epochales Ereignis, was eigentlich ein eher bescheidener und zudem mit unfairen Mitteln erreichter Erfolg war: Das Programm gab vor, ein 13-jähriger Junge aus der Ukraine zu sein, und lieferte damit eine plausible Erklärung für sein schlechtes Englisch und sein eingeschränktes Weltwissen, die anderenfalls wohl die Gutachter eher an eine Maschine hätten denken lassen.

Bisher hat kein Algorithmus den Turing-Test bestanden, und es ist auch keiner nur knapp gescheitert. Zudem ist zwei-



felhaft, ob die Methoden, die bei den abgeschwächten Tests erfolgreich waren, beim echten zum Ziel führen. Eine Weile kann ein Programm einen Experten an der Nase herumführen, indem es zu jeder Frage eine Antwort aus einem großen gespeicherten Vorrat auswählt. Da Schiedsrichter immer wieder im Wesentlichen dieselben Fragen zu stellen pflegen, ist die Chance groß, im Speicher eine passende Antwort zu finden. Wenn die Maschine dann noch mit Hilfe eines Programms zur grammatischen Analyse Versatzstücke aus der Frage in die Antwort einbaut, entsteht sogar der Eindruck eines gewissen Verständnisses. Findet sie gar keine passende Replik, kontert sie mit einer Gegenfrage. Einem Journalisten, der »Eugene Goostman« fragte, wie er sich nach seinem Sieg fühle, erwiderte das Programm im Juni 2014: »Was ist das für eine dumme Frage; können Sie mir sagen, wer Sie sind?«

Auf der Suche nach der universellen Intelligenz

Für spezielle Aufgaben – einschließlich einer gewissen Sprachbeherrschung – erreicht heute die künstliche Intelligenz das Leistungsniveau des Menschen oder übertrifft es sogar weit. Das ist in Einzelfällen erstaunlich und ein Erfolg einer regelmäßig fortschreitenden Disziplin. Allerdings wurden diese Fortschritte praktisch nie durch Nachahmung der menschlichen Intelligenz erzielt und tragen zu deren Verständnis dementsprechend auch praktisch nichts bei. Insbesondere kann die Forschungsrichtung noch kein System vorweisen, das über eine wirklich allgemeine oder »universelle« Intelligenz verfügt. Das aber wäre zum Bestehen eines echten Turing-Tests erforderlich.

Was wäre nun eine solche universelle Intelligenz? Auf diese Frage gibt es einige neuere Antwortversuche sehr abstrakter, mathematischer Natur – wohl der beste Weg, um zu einem absoluten, vom Menschen unabhängigen Begriff der Intelligenz zu gelangen.

Eine naheliegende Hypothese lautet: Intelligenz ist die Fähigkeit, Regelmäßigkeiten und Strukturen aller Art zu erfassen oder, in Begriffen der Informatik ausgedrückt, Daten zu komprimieren und zukünftige Ereignisse vorauszusagen. Diese Fähigkeit bietet einen evolutionären Vorteil, denn ihr Träger kann sich die erkannten Regelmäßigkeiten durch entsprechend angepasstes Verhalten zu Nutze machen.

AlphaGo, der neue Go-Meister

Kürzlich haben die Maschinen im Brettspiel offenbar ihre letzte Schwäche überwunden: das fernöstliche Spiel Go. In einem nach den klassischen Regeln gespielten Turnier vom 5. bis zum 9. Oktober 2015 gewann das Programm »AlphaGo« mit 5:0 gegen den dreifachen Go-Europameister Fan Hui (*Nature* 529, S. 445 und 484, 2016). Damit erreichten die Programmierer der Firma Google DeepMind aus London ihr Ziel schätzungsweise zehn Jahre früher als erwartet.

Go ist nicht etwa deswegen schwieriger als Schach, weil die Regeln komplizierter wären – im Gegenteil: Es gibt nur eine Sorte Figuren (»Steine«). Die Parteien Schwarz und Weiß setzen abwechselnd einen Stein ihrer Farbe auf einen der 19·19 Kreuzungspunkte eines regelmäßigen Gitters. Gesetzte Steine werden nicht mehr bewegt, sondern lediglich entfernt, wenn sie von gegnerischen Steinen »umzingelt« sind. Gewonnen hat, wer am Ende den größeren Teil des Spielfelds beherrscht.

Was das Spiel den einfachen Regeln zum Trotz so kompliziert macht, ist die schiere Anzahl der Züge sowie der Möglichkeiten pro Zug. Während ein Schachspieler in jedem Zug durchschnittlich etwa 35 erlaubte Aktionen zur Auswahl hat und kaum ein Spiel länger als 80 Züge dauert, sind die entsprechenden Werte für Go 250 und 150.

Bei schlichter strukturierten Spielen konnten die Programmierer mit roher Gewalt (»brute force«), gepaart mit großer Raffinesse, Erfolge erzielen, indem sie den Computer im Wesentlichen alle zulässigen Spielstellungen durchprobieren ließen. Durch Rückwärtsschließen von den Endstellungen wiesen sie jeder Stellung einen Wert zu: +1, wenn Weiß einen Sieg erzwingen kann, –1 im umgekehrten Fall.

Schon für das Schachspiel ist jedoch diese erschöpfende Durchsuchung des Spielbaums ein Ding der Unmöglichkeit und wird es auf absehbare Zeit bleiben. Stattdessen versucht ein Spielprogramm zu jeder Stellung einen geschätzten Wert zwischen –1 und 1 zu finden: Je größer dieser Wert, desto günstiger ist die Stellung für Weiß. Aus der aktuellen Stellung denkt es eine überschaubare Anzahl von Zügen voraus, findet Bewertungen (die genannten Schätzwerte) für alle so erreichbaren Stellungen und wählt anhand dieser Information seinen nächsten Zug aus (*Spektrum der Wissenschaft* 12/1990, S. 94).

Bereits die Vorläufer von AlphaGo sind davon abgekommen, auch nur jenen Ast des Spielbaums, der von der gegenwärtigen Stellung ausgeht, erschöpfend zu durchsuchen. Vielmehr probieren sie zahlreiche nach dem Zufallsprinzip ausgewählte lange Zugfolgen durch (»Monte Carlo tree search«, MCTS) und wählen dann den Zug aus, der nach Mittelung über alle diese Versuche optimal erscheint.

Mit oder ohne Zufall: Entscheidend für den Erfolg ist das Vorwissen, welches das Spielprogramm mitbringt. Das steckt bei den klassischen Programmen in der Bewertungsfunktion, also dem Algorithmus, der zu einer gegebenen Stellung deren

Schätzwert berechnet. Für die Monte-Carlo-Versionen kommt noch die Strategie hinzu, nach der das Programm die Zufallszugfolgen auswählt. Eine gute Strategie bevorzugt aussichtsreiche Züge, lässt aber denen, die auf den ersten Blick schlecht aussehen, noch eine gewisse Chance.

Neu an der Software der Londoner Spezialisten ist die Methode des Wissenserwerbs. Bisher konstruierten die Programmierer ihre Bewertungsfunktionen, indem sie ihre Maschinen große Datenbanken mit aufgezeichneten Partien durchsuchen ließen und damit Statistiken erstellten. Bei Schach fließen auch noch aus der Literatur bekannte Faustregeln über den Wert gewisser Figuren und Stellungen ein. AlphaGo dagegen erlernt sein Wissen selbst, und zwar mit Hilfe eines tiefen (vielschichtigen) neuronalen Netzes (*Spektrum der Wissenschaft* 9/2014, S. 62). So wie die Schichten eines neuronalen Netzes bei der Bildanalyse quasi automatisch umso größere Teilbereiche eines Bildes erfassen, je höher sie liegen (*Spektrum der Wissenschaft* 12/2015, S. 86), so analysiert das neuronale Netz von AlphaGo eine gegebene Go-Stellung auf verschiedenen Niveaus, ohne explizit darauf programmiert worden zu sein.

In einer ersten Phase lernte das 13-schichtige neuronale Netz an 30 Millionen Spielstellungen aus der Go-Datenbank KGS; in der nächsten verbesserte es dieses Wissen, indem es gegen jeweils ältere Versionen seiner selbst spielte und die Ergebnisse auswertete. In der dritten schließlich lernte es unter Verwendung dieser Vorerfahrungen eine Bewertungsfunktion; diese ging in die Entscheidungen während der Partie ein.

Hat AlphaGo seinen Erfolg auf grundsätzlich anderem Weg erzielt als ein Mensch? Sein Gegner Fan Hui hatte nicht den Eindruck: »Wenn niemand es mir erzählt hätte, dann hätte ich meinen Gegner für einen etwas seltsamen, aber starken Spieler gehalten – und auf jeden Fall für einen echten Menschen.« Mit etwas gutem Willen könnte man diese Art des Lernens, vor allem die zwei Phasen »abschauen beim Meister« und »sich selbst des Stoffs bemächtigen« als menschentypisch ansehen, zumal neuronale Netze in ihrem Aufbau dem menschlichen Gehirn nachempfunden sind.

In einer negativen Eigenschaft gleicht das System allerdings dem Menschen: Es kommt zwar auf Ideen, aber hinterher kann niemand sagen, wie. Die Antwort steckt in den internen Parametern (den »synaptischen Gewichten«) des neuronalen Netzes. Diese sind zwar, im Gegensatz zu entsprechenden Eigenschaften menschlicher Nervenzellen, der Erforschung ohne Weiteres zugänglich, aber eine tiefere Einsicht oder gar eine algorithmische Formulierung lässt sich daraus nicht gewinnen.

Ein Turnier gegen den Koreaner Lee Sedol, der als derzeit stärkster Go-Spieler der Welt gilt, ist für März 2016 geplant.

Christoph Pöppe

Ein Beispiel: Wer in der Zahlenfolge 4, 6, 9, 10, 14, 15, 21, 22, 25, 26, 33, 34, 35, 38, 39, 46, 49, 51, 55, 57 die Struktur »Produkte zweier Primzahlen, nach Größe geordnet« erkennt, kann die Sache nicht nur kürzer ausdrücken, sondern weiß auch, was folgen wird: 58, 62, 65, 69, 74, 77, 82, 85, 86, 87, ...

Der amerikanische Informatiker Ray Solomonoff hat um 1965 diese Beziehung zwischen Intelligenz, Kompression und Voraussage formalisiert. Dabei griff er ein viel zitiertes Prinzip des Philosophen William of Ockham (1288–1347) auf, das heute als »Ockhams Rasiermesser« so formuliert wird: Unter allen mit den Beobachtungen zu vereinbarenden Erklärungen eines Sachverhalts ist die einfachste zu bevorzugen. In Solomonoffs Version ist die »einfachste« die am stärksten komprimierte, das heißt diejenige mit dem kleinsten Verhältnis zwischen Erklärung und erklärten Daten.

Wenn man diese beiden Größen – Menge der Daten und Umfang der Erklärung – auf vernünftige Weise zahlenmäßig ausdrücken kann, wird aus der letzten Version ein mathematisches Kriterium. Genau das leistet die algorithmische Theorie der Information, die auf Andrej Kolmogorow und Gregory Chaitin zurückgeht (Spektrum der Wissenschaft 11/2012, S. 82, und 2/2004, S. 86). Nach ihr ist die Komplexität einer beliebigen Zeichenkette (insbesondere einer vollständig beschriebenen Theorie) gleich der Länge des kürzesten Programms, das zur Erzeugung derselben fähig ist.

Auf der Basis dieses Komplexitätsbegriffs gab schließlich der deutsche Informatiker Marcus Hutter, der inzwischen an der Australian National University lehrt, eine Definition der »universellen Intelligenz«. Und zwar ist sie zu messen als »der Erfolg einer Strategie, gemittelt über alle vorstellbaren Umwelten«. Die zunächst wenig aufschlussreiche Formulierung wird dadurch interessant, dass sich alle in ihr vorkommenden Begriffe im Sinn der Informatik interpretieren lassen: »Strategie« ist ein beliebig leistungsfähiges Stück Software, »Umwelt« alle Daten, mit denen sie konfrontiert werden könnte – unter der relativ schwachen Voraussetzung, dass diese Daten nicht vollkommen willkürlich sind, sondern gewissen Gesetzmäßigkeiten gehorchen, so wie unsere natürliche Umwelt den Gesetzen der Physik unterliegt. »Erfolg« schließlich ist zu verstehen als Maximierung einer sinnvoll definierten Zielfunktion, die typischerweise das eigene Überleben und die Erzeugung zahlreicher Nachkommen umfasst.

Hutter präzisiert seine Definition noch durch etliche technische Details, die hier nicht wiedergegeben werden können. Auch damit bleibt jedoch sein Konzept zu abstrakt, um unmittelbar anwendbar zu sein: Noch ist die Vorstellung, man könne die universelle Intelligenz eines KI-Systems durch einen Test bestimmen, fern jeder Realität. Gleichwohl eignet sich der Begriff zum Aufbau einer mathematischen Theorie, die nicht mehr von den Eigenheiten der menschlichen Intelligenz abhängt. Im Gegensatz zu den eingangs erwähnten multiplen Intelligenzen von Howard Gardner wäre somit Intelligenz ein einheitliches Konzept, und an die Stelle der gängigen, von Willkür geprägten Intelligenztests könnte eine

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema »künstliche Intelligenz« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/kuenstliche-intelligenz



DREAMSTIME / MARCIN ZERKOWSKI

Klassifikation treten, die jedem lebenden oder mechanischen Wesen in sinnvoller Weise ein Maß an Intelligenz zuschreiben würde.

Ihrer gegenwärtigen Realitätsferne zum Trotz stellt diese Theorie einen bedeutenden Fortschritt dar. Mittlerweile hat die »universelle künstliche Intelligenz« den Rang eines eigenen Forschungsgebiets und eine eigene Fachzeitschrift, das frei zugängliche »Journal of Artificial General Intelligence«.

Zweifelloos um zu verhindern, dass sich die Disziplin mit der Entwicklung ihres mathematischen Teils zufriedengibt, hat Marcus Hutter einen Informatikwettbewerb ins Leben gerufen. Er beruht auf der Idee, dass man umso intelligenter ist, je stärker man Daten zu komprimieren vermag. Wer gewinnen und einen Teil des Preisgelds von 50 000 Euro einstreichen will, muss gewisse Inhalte der Wikipedia möglichst gut komprimieren, wobei diese als eine Art Miniaturabbild des Reichtums unserer Welt gilt (siehe »Der Kompressionswettbewerb von Marcus Hutter«, S. 82).

Vielleicht wird die neue Disziplin den Forschern dabei helfen, die universelle Intelligenz zu realisieren, die unseren aktuellen Maschinen so offensichtlich fehlt. ~

DER AUTOR



Jean-Paul Delahaye ist emeritierter Professor am Institut für Grundlagen der Informatik der Universität de Lille.

QUELLEN

Dowe, D., Hernández-Orellano, J.: How Universal can an Intelligence Test Be. In: Adaptive Behavior 22, S. 51–69, 2014

Goertzel, B.: Artificial General Intelligence: Concept, State of the Art, and Future Prospects. In: Journal of Artificial General Intelligence 5, S. 1–48, 2014

Hutter, M.: Universal Artificial Intelligence: Sequential Decisions Based on Algorithmic Probability. Springer, Heidelberg 2005

Hutter, M.: 50 000 Euros Prize for Compressing Human Knowledge. <http://prize.hutter1.net>

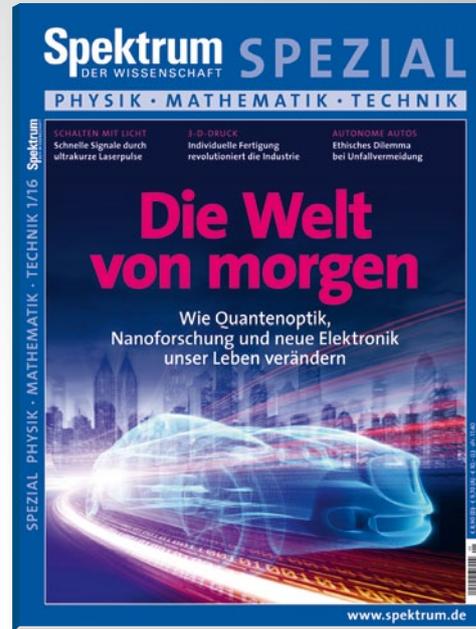
Tesaro, G. et al.: Analysis of Watson's Strategies for Playing Jeopardy! <http://arxiv.org/abs/1402.0571>

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1396798

Unsere Neuerscheinungen



Cappuccino-Effekt: Klänge aus dem Milchschaum • Heiz-Paradoxon: Rätselhafte Temperaturzunahme • Bermuda-Dreieck: Lassen gigantische Gasblasen Schiffe sinken? • € 8,90



Schalten mit Licht: Schnelle Signale durch kurze Laserpulse • 3-D-Druck: Individuelle Fertigung revolutioniert die Industrie • Autonome Autos: Dilemma bei Unfallvermeidung • € 8,90



Esskultur: Evolution am Kochtopf • Adipositas: Übergewicht durch Darmflora • Fischfarmen für eine Milliarde Chinesen • Nahrungsergänzungsmittel: Entzauberte Antioxidanzien • € 8,90



Alkohol und Zigaretten • Heroin vom Staat: Ein Modellprojekt für Junkies • Exzessives Kiffen • Frust und Völlerei • Facebook, Sport und Glücksspiele: Wann es zu viel wird • € 8,90 (Neuaufgabe)

Alle Hefte auch im Handel erhältlich!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/neuerscheinungen

E-Mail: service@spektrum.de

Hier QR-Code per Smartphone scannen!



1916

Schiffsspuren im Meer

»Jeder, der einmal auf dem Meere gefahren ist, weiß,

daß ein in Bewegung befindliches Schiff im Wasser Strömungen hervorruft. Die Kielwasserlinie bleibt lange bestehen. Die zahllosen Deutungsversuche gipfeln darin, daß die Beständigkeit der Kielwasserlinie Folge der mit dem Kühlwasser abgegebenen fettigen Stoffe sei. Diese Erklärung stimmt mit

den Tatsachen nicht überein, denn erstens sind unsere modernen Dampfschiffe so gebaut, daß das ins Kühlwasser gelangende Öl abgeschieden wird, zweitens findet sich das Kielwasser auch bei Segelschiffen. In Wirklichkeit entsteht die Kielwasserlinie dadurch, daß die elliptische Form des Schiffs-

körpers Strömungen verursacht, die hinter dem Kiel von beiden Seiten aufeinanderprallen. Dadurch werden Tausende kleiner Wirbel hervorgerufen. Die volle Entwicklung dieser Wirbel erreicht erst den Höhepunkt, wenn die Antriebsursache, das Schiff, schon weit entfernt ist.« Kosmos 3, 1916, S. 101

Ein Baum auf einem Baum

»Mit zu den merkwürdigsten Beobachtungen, über die uns Kosmos-Mitglieder aus dem Schützengraben berichtet haben, gehört das seltsame Spiel der Natur, das von einem als Infanteristen tätigen Künstler gezeichnet wurde. Auf dem untersten, kräftig ausgebildeten Aste einer Fichte entsproß ein Bäumchen, das sich kräftig wie auf dem Boden wachsend entwickelte. Wahrscheinlich handelt es sich um ein sogenanntes ›schlafendes Auge‹, das erwachte und dann als Schößling aufwärts trieb. Die Einzelheiten einer derartigen Bildung sind noch nicht genau erschlossen.« Kosmos 3, 1916, S. 110



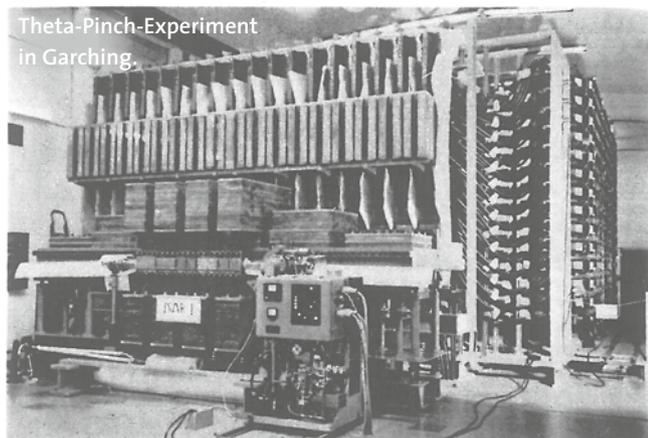
Ausgetriebene Knospe auf einem Fichtenast, Zeichnung eines Infanteristen.

Der erste Rollator

»Für Kranke, deren Gehmuskulatur eine beschränkte Gebrauchsfähigkeit aufweist, kommt die Anwendung einer Vorrichtung in Betracht, die ihnen ein gefahrloses Vornehmen von Steh- und Gehversuchen ermöglicht. Technisch und wissenschaftlich auf das Vollkommenste durchgearbeitet, bietet dieser Apparat dem Kranken beste Gelegenheit, selbständig nach eigenem Vermögen Gehversuche zu unternehmen. Der Apparat kann im Zimmer und im Freien auf glatten Wegen benutzt werden.« Die Umschau 11, 1916, S. 220



Lenkbares »Gehrad«.



Theta-Pinch-Experiment in Garching.

Heiß auf Plasma

»Bei einem in Garching durchgeführten Großexperiment wird ein Plasma in einer Quarzröhre erzeugt, durch extrem starke elektromagnetische Kräfte in kürzester Zeit komprimiert und dabei so aufgeheizt, daß die Temperatur der positiv geladenen Ionen, der Atomkerne, etwa 60 Millionen Grad, die der Elektronen etwa 20

1966

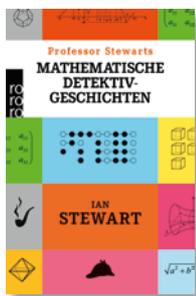
Millionen Grad, beträgt. Damit werden in diesem Experiment – verglichen mit Anlagen im In- und Ausland – im Augenblick die höchsten Ionen- und Elektronentemperaturen beobachtet.« Die Umschau 5, 1966, S. 166

Contergan-Wirkstoff hilft bei Lepra

»Die tragischen Folgen, die sich bei werdenden Müttern nach dem Einnehmen thalidomidhaltiger Schlafmittel (Contergan) einstellen, sind noch in frischer Erinnerung. Im Hansen-Lepra-Hospital in Jerusalem wurde von dem Dermatologen Dr. Jakob Sheshkin zufällig entdeckt, daß das Thalidomid eine verblüffende Wirkung auf viele Erscheinungen der Lepra ausübt. Das Mittel war ursprünglich in der Absicht verabfolgt worden, die Reaktionsschmerzen, die bei Lepra-Schü-

ben auftreten, zu mildern. Dabei ergab sich, daß durch das Thalidomid auch Symptome der Lepra selbst, wie Hautausschläge, Augenentzündungen, Appetitstörungen, Kopf- und Gliederschmerzen, eindeutig gebessert wurden.« Kosmos 3, 1966, S. 118–119

(Anmerkung der Redaktion: Thalidomid ist seit 1998 in den USA als Wirkstoff gegen Lepra zugelassen; in der EU seit 2008 zur Behandlung des multiplen Myeloms.)



Ian Stewart
Professor Stewarts
Mathematische Detektivgeschichten
 Aus dem Englischen von
 Monika Niehaus und Bernd Schuh
 Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 2015
 400 S., € 12,99

MATHEMATIK

Doyles würdiger Nachfolger

Eine wunderbare Geschichtensammlung vom Meister der Unterhaltungsmathematik.

Das vorliegende Werk bildet mit »Professor Stewarts Mathematisches Sammelsurium« (2011) und »Professor Stewarts Mathematische Schätze« (2013) eine Trilogie. Und gleich vorweg lässt sich sagen: Freunde der Unterhaltungsmathematik würden es sicher begrüßen, wenn der Autor die Reihe fortsetzte. Der emeritierte Professor der University of Warwick (England) wurde mehrfach ausgezeichnet – vor allem wegen seiner Fähigkeit, Sachverhalte aus der Mathematik und ihren Anwendungsgebieten unterhaltsam und verständlich darzustellen.

Beeindruckend ist seine Sammlung der Darstellungsmöglichkeiten natürlicher Zahlen nur allein mit Hilfe der Ziffer 1

Von wenigen Ausnahmen abgesehen sind die Abschnitte des Buchs unabhängig voneinander lesbar. Die meisten verlangen keine besonderen mathematischen Vorkenntnisse, sind aber trotzdem auch für Mathematiker interessant. 150 Geschichten nehmen 320 Seiten in Anspruch, deren Auflösungen einschließlich zahlreicher Literaturhinweise weitere 80 Seiten. Der aus dem Englischen übersetzte Text ist im Allgemeinen leicht verständlich, manchmal allerdings empfiehlt sich zweimaliges Lesen, um alle Feinheiten nachzuvollziehen. Dem Rezensenten ist nur ein offensichtlicher Übersetzungsfehler

aufgefallen: die Verwechslung des Begriffs »Exponent« mit »Potenz«. Warum die Übersetzer allerdings (ebenso wie die von anderen Werken) »perfect squares« zu »perfekten Quadraten« machen statt schlicht zu »Quadratzahlen«, bleibt ein Rätsel.

Anders als der Titel vermuten lässt, besitzt nur rund jede fünfte Geschichte einen kriminalistischen Hintergrund; die anderen haben keinen. Diese 29 Storys beleuchten die detektivische Arbeit des Gespanns »Hemlock Soames« und »Dr. Whatsup«, die in der Bakerstreet 222 B leben – gegenüber von 221 B, dem

Wohnort der berühmten Protagonisten aus den Erzählungen Arthur Conan Doyles (1869–1930). Und so wie Sherlock Holmes sich mit seinem Erzfeind Professor Moriarty konfrontiert sah, hat auch Hemlock Soames einen namens Professor Mogiarty.

Stewart entwickelt in seinen Detektivgeschichten eine reiche Fantasie und erweist sich als würdiger Nachfolger Doyles. Wer sich für mathematische Probleme interessiert und nichts dagegen hat, diese in Form fiktiver, humorvoller Kriminalfälle präsentiert zu bekommen, dem wird das Werk gefallen. In den »Erinnerungen des Dr. Whatsup«

beispielsweise thematisiert Stewart die Suche nach den kleinsten Tripeln (a, b, c) und (A, B, C) von ganzen Zahlen, für die sowohl $a \cdot b \cdot c = A \cdot B \cdot C$ gilt als auch $a + b + c = A + B + C$. Daraus entwickelt er eine Erzählung mit mysteriös verpackten Schachteln gleichen Volumens sowie ganzzahliger Länge, Breite und Höhe, die auf sieben Seiten ausgesponnen schließlich zur Klärung eines Mordfalls beitragen.

Etlche Geschichten basieren auf bemerkenswerten Eigenschaften von Zahlen. Unter anderem geht es darum, welches die kleinste natürliche Zahl ist, die sich auf genau drei (vier, fünf, sechs) Arten als Summe von Kubikzahlen darstellen lässt. Beeindruckend ist seine Sammlung der Darstellungsmöglichkeiten natürlicher Zahlen nur allein mit Hilfe der Ziffer 1 (und zugelassener Operationen wie $+$, $-$, $:$, $\sqrt{\quad}$, ...).

Der Autor hat offensichtlich einen guten Überblick über alte und neue Ideen zur Unterhaltungsmathematik, und er hält seine Leser diesbezüglich auf dem Laufenden. Im vorliegenden Werk rät er etwa, sich mit geomagischen Quadraten zu beschäftigen. Darunter versteht man eine quadratische Anordnung von Formen, die zusammengesetzt immer die gleiche Figur ergeben – egal, ob man Formen einer beliebigen Zeile, Spalte oder Diagonale zusammenlegt. Diese wunderbare Verallgemeinerung der seit Jahrtausenden bekannten magischen Quadrate stammt von dem britischen Ingenieur Lee Salwos (geboren 1944), und mittlerweile gibt es dazu reichhaltige Literatur.

Wer Stewart aus früheren Büchern kennt und schätzt, wird auch diesmal von der bunten Mischung aus logischen Rätseln, Knobelaufgaben, Paradoxien, Fehlschlüssen, Kartentricks, weiterentwickelten Sudokus, Anekdoten und physikalischen Phänomenen begeistert sein. Wer den Autor zum ersten Mal liest, wird sich vermutlich weitere Werke von ihm anschaffen.

Heinz Klaus Strick

Der Rezensent ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.



Mikel Landa, Luke Duggleby

Salz der Erde

mare, Hamburg 2015

348 S., € 79,-

ERDE

Weißes Gold

Dieser Bildband zeigt, wie Menschen in verschiedenen Regionen Salz gewinnen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf traditionellen Verfahren.

Architekt Mikel Landa und Dokumentar Fotograf Luke Duggleby haben sich auf eine Tour rund um den Globus gemacht. Sie reisten von Nord nach Südamerika sowie durch Europa, Afrika und Asien. Herausgekommen ist der vorliegende Bildband, der verschiedene Praktiken der Salzgewinnung ästhetisch höchst eindrucksvoll vorstellt.

Die Autoren führen den Leser an 29 Stellen, an denen das »weiße Gold« auf sehr unterschiedliche Weise gesammelt wird. Sie beschreiben jeden Ort auf einer Seite und präsentieren anschließend Fotos von dort. Während

man etwa in Spanien das Wasser stark salzhaltiger Quellen in flachen Becken verdunsten lässt, reicht die Kraft der Sonne im nördlichen Dänemark dafür nicht aus. Hier kochen die Menschen traditionell Meerwasser, um den begehrten Stoff zu gewinnen, was sich beispielsweise in einer wieder aktivierten historischen Anlage besichtigen lässt. Andernorts nutzen die Einwohner riesige Salzseen, die beim Austrocknen ehemaliger Gewässer zurückgeblieben sind, oder graben Salzstollen in die Erde – unter anderem in Äthiopien und Bolivien.

Diese Vielfalt ist beeindruckend und unterstreicht die enorme Bedeutung, die Salz hatte und hat: als Nahrungsmittel für Mensch und Tier, vor allem aber zum Haltbarmachen von Nahrung. Lange bevor es technische Kühlanlagen und moderne Konservierungsstoffe gab, ließen sich Lebensmittel mit dem weißen Gold vor dem Verrotten bewahren, was unter anderem den Handel mit ihnen ermöglichte. Das liegt freilich weit zurück.

Heute führt die industrielle Salzaufbereitung in Bergwerken dazu, dass viele klassische Methoden in Vergessenheit zu geraten drohen. Der Bildband von Landa und Duggleby unterstreicht, wie erhaltenswert diese Verfahren sind – sei es wegen der besonderen Qualität des erhaltenen Produkts, sei es aus kulturhistorischen Gründen.

Am Ende des Buchs beleuchten weitere Autoren die Geschichte der Salzgewinnung aus verschiedenen Blickwinkeln: Menschheitsentwicklung, Medizin, Geologie und Philosophie. Diese Texte runden den überaus gelungenen, wenngleich recht teuren Bildband sehr gut und anschaulich ab.

Tim Haarmann

Der Rezensent ist Geograf und arbeitet in Bonn.



Am Mirzaladi-See in Aserbaidschan schaufeln Arbeiter gelockerte Salzkruste zu großen Haufen (oben). Dort trocknet das Salz, bevor es mit Lastwagen zur Fabrik gefahren wird.

In Indonesien füllt eine Dorfbewohnerin frisches Meerwasser in die Salzkörbe ihrer Familie (rechts). Jeden zweiten Tag wiederholt sie das; am siebten Tag kann sie das Salz ernten.

BEIDE FOTOS: LUKE DUGGLEBY / LANDA OCH ANDRANO ARCHITECTOS; AUS MIKEL LANDA UND LUKE DUGGLEBY: SALZ DER ERDE, MIT FOTOS VON DESIMARE-VERLAGS, HAMBURG





Randall Munroe

Der Dinge-Erklärer – Komplizierte Sachen in einfachen Worten

Aus dem Englischen von Ralf Pannowitsch und Benjamin Schilling. Knaus, München 2015. 68 S., € 24,99

Die 1000 häufigsten Wörter – mehr braucht der Physiker und Comic-Autor Randall Munroe nicht, um seinen Lesern die Welt zu erklären, von Atombomben bis Waschmaschinen. Großformatige Zeichnungen sollen das Verständnis erleichtern. Allerdings sind sie so detailreich und unübersichtlich, dass sie eher Wimmelbildern als Infografiken gleichen. Die kleine Schrift erschwert das Lesen zusätzlich. Da viele Wörter nicht »erlaubt« sind, bedienen sich die Übersetzer ebenso wie der Autor kreativer Umschreibungen. Eine Ölplattform wird so zur »Schwimmstadt zum Löchermachen«. Naturwissenschaftlich vorgebildete Leser werden durch solche Verfremdungen auf unterhaltsame Weise dazu angeregt, über scheinbar Selbstverständliches nachzudenken. Wer allerdings mit dem Aufbau einer Zelle oder des Sonnensystems nicht vertraut ist, wird mit einigen Erklärungen wenig anfangen können, denn durch die Beschränkung auf wenige Wörter fehlen auch solche, die Anknüpfungspunkte geliefert oder klargemacht hätten, worum es überhaupt geht.

ELENA BERNARD



Aura Heydenreich und Klaus Mecke (Hg.)

Physik und Poetik – Produktionsästhetik und Werkgenese. Autorinnen und Autoren im Dialog

de Gruyter, Berlin/Boston 2015. 314 S., € 89,95

Im Jahr 2014 wurde das Erlanger Zentrum für Literatur- und Naturwissenschaften (ELINAS) gegründet. Es beschäftigt sich mit dem Wissenstransfer zwischen Literaturwissenschaft und Physik und gibt hierzu eine Schriftenreihe heraus. Der vorliegende erste Band eröffnet den Dialog zwischen Autoren der Gegenwartsliteratur und Experten beider Disziplinen. In ausführlichen Gesprächen über Literatur, Physik und ihre Wechselbeziehungen lernen Interessierte viel über die Denkweisen der Beteiligten und erfahren, welche Austauschmöglichkeiten es gibt. Auch wer die besprochenen Werke nicht kennt, kann den Unterhaltungen folgen und erhält dabei Anregungen für weitere Lektüre.

KATRIN HOCHBERG



Wolfgang Fiedler

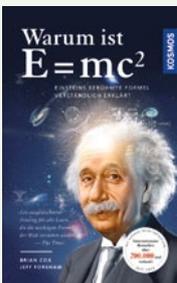
Die Vögel Mitteleuropas sicher bestimmen

Schlüssel zur Art-, Alters- und Geschlechtsbestimmung; Bildatlas mit Schnellzugang

Quelle & Meyer, Wiebelsheim 2015. Schlüssel: 342 S., € 24,95, Bildatlas: 856 S., € 29,95

Wie unterscheide ich einen Haus- von einem Gartenrotschwanz, wie erkenne ich einen jungen Mauersegler? Mit diesem zweiteiligen Werk von Wolfgang Fiedler, Leiter der Vogelwarte Radolfzell, lassen sich rund 650 mitteleuropäische Vogelarten identifizieren und betrachten. Der Bestimmungsschlüssel erlaubt es, anhand anatomischer Merkmale systematisch die entsprechende Art zu ermitteln; Strichzeichnungen und ein Glossar helfen dabei. Der Bildatlas wiederum zeigt 1750 Fotos, gruppiert nach Familien, und gibt Körpergrößen und Flügelspannweiten an – er eignet sich daher nur eingeschränkt für die Artbestimmung. Hilfreich: Schlüssel und Atlas präsentieren Federkleider von Jungtieren, erwachsenen Männchen und Weibchen. Für die Bestimmung aus der Distanz ist das Werk nicht optimal, lässt sich aber allen empfehlen, die Vögel aus der Nähe betrachten können, etwa bei Beringung, Bälgen im Museum oder in Kursen.

EVA DIEHL



Brian Cox, Jeff Forshaw

Warum ist $E=mc^2$? – Einsteins berühmte Formel verständlich erklärt

Kosmos, Stuttgart 2015. 320 S., € 19,99

Das gelungene Buch erlaubt auch Laien einen bemerkenswert tiefen Einblick in Einsteins Theorien. Dabei zeigt sich: Je genauer man hinsieht, desto weniger ist die Natur intuitiv zu erfassen. Man muss oft bereit sein, die Dinge so zu akzeptieren, wie sie aus der Theorie hervorgehen und sich im Experiment bestätigen. In Einsteins Welt sind Raum und Zeit keine voneinander unabhängigen Größen, sondern bilden eine vierdimensionale »Raumzeit«. Entfernungen hängen hier sowohl in der Zeit als auch im Raum vom Bewegungszustand des Beobachters ab. Ebenso erweisen sich Masse und Energie nicht als getrennte Entitäten, sondern lassen sich gemäß der titelgebenden Gleichung ineinander umwandeln. Wie die Autoren zeigen, gehört diese Gleichung zu den Grundpfeilern der modernen Quantenphysik – welche sich bis heute nicht mit der allgemeinen Relativitätstheorie vereinen lässt.

MARKUS NEUROHR



Josef H. Reichholf

Mein Leben für die Natur

Auf den Spuren von Evolution und Ökologie

Fischer, Frankfurt am Main 2015

638 S., € 26,99

BIOLOGIE

Informativer Lebensrückblick

Der renommierte Biologe Josef Reichholf berichtet von seinen Forschungsreisen. Heraus kommt ein Werk voller erstaunlicher Einsichten.

Als Josef Reichholf 1970 eine Expedition in die brasilianischen Tropen unternahm, riet man ihm, einen großen Bogen um Lanzenottern und Klapperschlangen zu machen. Beide Schlangenarten sind für Menschen hochgiftig. Reichhofs Interesse an den Tieren war geweckt, und er beschäftigte sich mit ihnen, wobei er verblüffende Erkenntnisse gewann. Warum, fragte er sich beispielsweise, schlägt die Lanzenotter unvermittelt zu, wenn sie sich bedroht fühlt? Wohingegen die Klapperschlange, die mit ihr ziemlich eng verwandt

Solche spannenden Einsichten vermittelt das vorliegende Buch zuhauf. Reichholf hat in seiner fünf Jahrzehnte währenden Laufbahn als Wissenschaftler etliche Forschungsreisen unternommen, die ihn in fast alle Regionen der Erde führten. Welche Erfahrungen er dabei machte und welche Erkenntnisse er gewann, beschreibt er in dem Band detailliert und fesselnd.

Unter anderem geht er auf das Phänomen ein, dass Zebras ein schwarz-weiß gestreiftes Fell entwickelt haben. Dieses schützt sie vor Blut saugenden

Warum macht die Klapperschlange Geräusche, bevor sie zuschlägt? Reichhofs Antwort: Weil das Rasseln ursprünglich ein Warnsignal an Pferde war

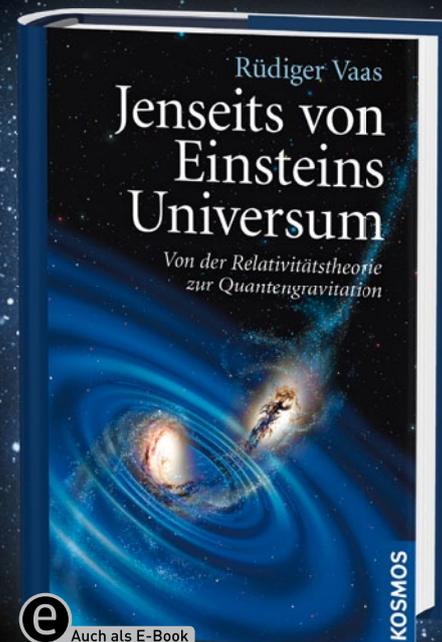
ist, bei Annäherung warnende Rasselgeräusche erzeugt?

Reichhofs Antwort: weil das Rasseln ursprünglich ein Warnsignal an Pferde war. Denn in Nordamerika, wo sich die frühesten Vertreter der Pferdefamilie entwickelten und sich ihre Evolution großteils abspielte, drangen die Vierbeiner oft in den Lebensraum der Klapperschlangen ein und zertrampelten diese, woran sich die Kriechtiere mit Gegenmaßnahmen anpassten. Dies erklärt auch, warum Antikörper aus Pferdeblut gegen Klapperschlangengift wirken; ein Umstand, den man sich beim Behandeln von Gebissenen zu Nutze macht.

Tsetsefliegen. Denn die Facettenaugen der Insekten können nur dunkle Silhouetten erfassen, die sich deutlich gegen einen hellen Hintergrund abheben. Doch warum, fragt der Autor, besitzen dann nicht auch andere Säugetiere der ostafrikanischen Savanne ein solches Streifenmuster, und warum ist es ebenso wenig beim *Homo sapiens* und seinen Vorfahren zu finden?

Die Antwort darauf ist komplex. Zebras und Menschen besitzen im Gegensatz zu anderen Säugern keine Immunität gegenüber den einzelligen Parasiten (Trypanosomen), die von den Fliegen übertragen werden. Laut Reichholf liegt das daran, dass Menschen

Das — verbogene Universum



464 Seiten, € / D 24,99

- Alles über den Glanz und die Grenzen der weltbesten Theorie
- Einsteins Erbe: die aktuelle Suche nach einer Weltformel

und Pferde (zu denen Zebras gehören) im Vergleich zu anderen Savannentieren wenig schlafen. Ihr Immunsystem werde daher mit Krankheitserregern wie Trypanosomen nicht so gut fertig wie das anderer Arten.

Die evolutionäre Anpassung der Zebras daran, das gestreifte Fell, war dem Menschen verwehrt, denn er büßte den Großteil seiner Behaarung schon früh ein. Stattdessen wurde er zum saiso-

wald benutzte Reichholz regelmäßig Flusswasser, um sich die Zähne zu putzen – und stellte schon nach kurzer Zeit Gebissdefekte fest. Der Grund: Das kristallklare Nass enthielt so gut wie kein Kalzium und löste dieses aus den Zähnen heraus. Den Biologen brachte das zu der Erkenntnis, dass fast sämtliche Gewässer Südamerikas extrem arm an Mineral- und Nährstoffen sind, ebenso wie die Böden dort. Denn außer in den

Im amazonischen Regenwald putzt sich Reichholz die Zähne mit Flusswasser. Er stellt schon bald Gebissdefekte fest – und erkennt den Mineral- und Nährstoffmangel in der Region

nenal Nomaden. Dies erlaubte ihm, den in der Regenzeit gebärenden und oft in feuchten Wäldern lebenden Tsetsefliegen einigermaßen auszuweichen. Reichholfs Überlegungen, die auf intensiven Feldforschungen in Ostafrika beruhen, münden in eine erstaunliche These: Die Evolution der menschlichen Spezies wurde stark von der Konfrontation mit den Fliegen geprägt.

Auf einer anderen Forschungsexpedition im zentralamazonischen Regen-

walden gibt es in Südamerika keine Vulkane, die solchen natürlichen Dünger liefern.

Die Amazonaswälder wachsen daher auf einer Humusschicht, die kaum dicker ist als einige Zentimeter; darunter nur Sand und Silikate. Warum bringen ausgerechnet diese Wälder, die auf so dürrtütiger Basis wuchern, eine ungeheure Vielfalt an Pflanzen und Tieren hervor? Weil gerade die prekären Lebensverhältnisse verhindern, dass sich

einige wenige Arten auf Kosten vieler anderer durchsetzen, schreibt der Biologe. Jede Nische, und sei sie noch so klein, müsse genutzt werden – und so entstünden etliche jeweils hochspezialisierte Spezies. Allerdings seien die meisten dortigen Tierarten selten, und auf 1000 Tonnen pflanzliche Biomasse kämen allenfalls 180 Kilogramm tierische; die Hälfte davon stellten Termiten und Ameisen.

»Mein Leben für die Natur« erweist sich als faktenorientiertes, exzellentes Sachbuch mit biografischen Anklängen. Es wartet mit einer überbordenden Fülle von Beobachtungen und Erkenntnissen auf und nimmt zudem irrtümliche Annahmen ins Visier, von denen sich mancher Naturschützer noch heute leiten lässt – etwa die überkommene Vorstellung, ökologische Zusammenhänge seien statisch und von Gleichgewichten geprägt. Ein Personen- und Sachregister hätte dem Werk allerdings gutgetan.

Frank Ufen

Der Rezensent ist promovierter Soziologe und Wissenschaftsjournalist.



Andreas Müller
Zeitreisen und Zeitmaschinen
Heute Morgen war ich noch gestern
Springer Spektrum,
Berlin und Heidelberg 2016
179 S., € 14,99

PHYSIK

Reise nach Irgendwann

Ein Astrophysiker schildert, was uns bei einer Tour in die Zukunft möglicherweise erwartet – und welche Gefahren sie birgt.

Was könnte die Welt in 100 Jahren von der heutigen unterscheiden? Beispielsweise, dass Menschen unter Wasser wohnen. Große Metropolen wie New York oder Hongkong erstrecken

sich bis auf den Grund der angrenzenden Meere, erzwungen durch Überbevölkerung und Klimawandel. Die Menschen flanieren durch Unterwasserparks und Einkaufszentren, während

über ihnen Fische schwimmen und Quallen treiben.

Dieses Szenario entwirft der Astrophysiker und Wissenschaftsautor Andreas Müller im vorliegenden Buch. Er erklärt darin die physikalischen Grundlagen der Zeitreise und schildert seine Visionen für die Zukunft. Zudem versetzt er den Leser in die Gemütslage der Menschen, die zu Beginn des 20. Jahrhunderts lebten, und geht der Frage nach, ob diese sich eine vernünftige Vorstellung von unserer Gegenwart hätten machen können.

Müller ist kein Fantast. Bereits am Anfang des Buchs macht er dem Leser unmissverständlich klar: Es wird wohl niemals jemand in eine Zeitmaschine steigen. Technologien, um sich in der Zeit zu bewegen, erscheinen zwar nicht völlig unmöglich, doch die praktischen Hürden sind unüberwindbar. Um dies klarzustellen, erläutert der Astrophysi-

ker gut verständlich, wie sich das physikalische Wissen über Licht und Zeit in den Relativitätstheorien Albert Einsteins bündelt. Müller gibt Einblicke in die Kosmologie, auf deren Größenskalen sich die meisten beobachtbaren Phänomene rund um Raumzeit und Licht abspielen. Sein Fazit: Menschen, die in einer »Raum-Turbokapsel« beinahe lichtschnell auf Schwarze Löcher oder Wurmlöcher zusteuern, um einen

nigten Kapsel würden Zeitreisende um rund zehn Prozent langsamer altern, verglichen mit Menschen außerhalb des Beschleunigers.

Wenn Müller darüber schreibt, wie die Menschen im Jahr 2100 leben könnten, tut er das mit einem Augenzwinkern. So sieht er die Enkelin des Schauspielers und Sängers Johannes Heesters (1903–2011), der 90 Jahre auf der Bühne stand, als dann älteste Frau mit 134 Jah-

Eine tonnenschwere Zeitreisekapsel auf beinahe Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen, verschlänge gigantische Energiemengen und führte zu riesigen Trägheitskräften

Zeitsprung zu wagen, hätten nicht den Hauch einer Überlebenschance. Entweder würden sie von tödlicher Strahlung erfasst oder von gigantischen Kräften zerquetscht.

Als Katapult für eine Raum-Turbokapsel böte sich ein Ringbeschleuniger an. Er könnte die Kapsel im Prinzip auf beispielsweise 99,5 Prozent der Vakuumlichtgeschwindigkeit beschleunigen, ähnlich wie man es heute bereits mit kleinsten Teilchen praktiziert. Allerdings sind schon für diese gigantische Energiemengen notwendig, um sie auf das anvisierte Tempo zu bringen. Das mit einem tonnenschweren Gefährt zu realisieren, ist utopisch. Selbst wenn es gelänge, müsste man den riesigen Trägheitskräften entgegensteuern, die in dem Ringsystem wirken würden. Und das alles für einen bescheidenen Effekt: In einer entsprechend beschleu-

ren, und in Deutschlands Regierung vermutet er die Urenkelin von Karl-Theodor zu Guttenberg. Des Deutschen liebstes Kind, schreibt er, werde nach wie vor das Auto sein. Mit solchen Späßchen lockert er seine seriös-sachlichen Prognosen dazu auf, wie sich Technik und Klimawandel, Gesellschaft und Politik entwickeln werden.

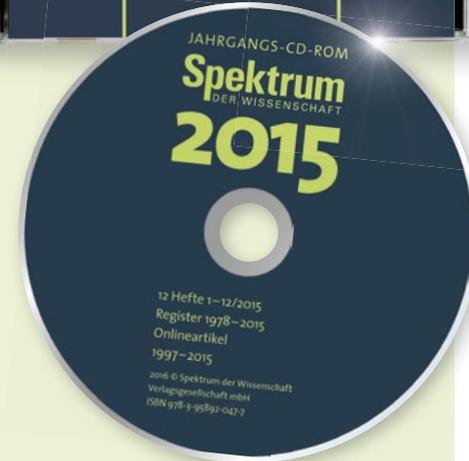
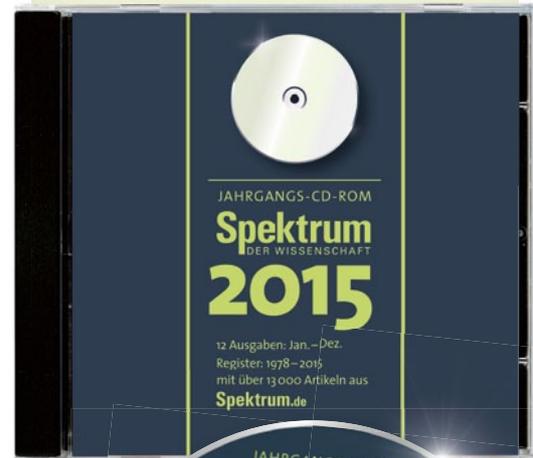
Gegen Ende des Werks blickt der Autor auf die Anfänge des 20. Jahrhunderts zurück. Dabei wird deutlich, wie sehr sich sowohl Technik und Naturwissenschaften, aber auch Mode und Freizeitbeschäftigungen gewandelt haben. Zusammen mit Müller grübelt man als Leser darüber nach, ob die damaligen Menschen diese Entwicklung hätten ahnen können. Dem Autor zufolge nicht. Analog dazu können auch wir uns wahrscheinlich nur einen winzigen Teil von dem vorstellen, was in 100 Jahren sein wird.

»Zeitreisen und Zeitmaschinen« lässt sich leicht und flüssig lesen. Nur in den Kapiteln, die sich mit der zu Grunde liegenden Physik befassen, wird die Lektüre an manchen Stellen fordernd. Von naturwissenschaftlichen Zusammenhängen über Sciencefiction bis hin zu Zukunftsprognosen deckt das kompakte Werk ein breites Themenspektrum ab.

Thorsten Naeser

Der Rezensent ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.

JAHRGANGS-CD-ROM 2015



Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Rezensionen finden Sie unter:

www.spektrum.de/rezensionen

So erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/recherche

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.de

Anpassen an den Klimawandel

Die Weinbauexpertin Kimberly Nichol beschrieb die Auswirkungen des Klimawandels auf klassische Weinbau-Regionen (»Der Pinot noir – ein Auslaufmodell?«, Februar 2016, S. 72).

Gerrit Schmezer, Ingelfingen: Um steigenden Temperaturen und längeren Trockenperioden entgegenzuwirken, ist

und bleibt die Tröpfchenbewässerung die einzige effiziente und nachhaltige Methode. Steht genug Wasser zur Verfügung, kann die Pflanze sich durch Transpiration selbst ausreichend kühlen. Problematisch ist dann nur direkte Sonneneinstrahlung auf die Trauben, was sich durch angepasste Entblätterungsmaßnahmen ausgleichen lässt. Um zusätzlich Wasser einzusparen, kann nach der Bewässerungsperiode eine flache Bodenbearbeitung im Unterstockbereich die entstandenen Kapillare im Boden brechen. Die zirka drei Zentimeter tief bearbeitete Schicht trocknet dann aus und bildet eine zusätzliche Schutzschicht für den feuchten Unterboden.

Ein weiteres Problem, das durch die langen Trockenperioden aufkommen kann, stellt die Unterversorgung mit Nährstoffen dar, da diese nur bei ausreichend Bodenfeuchtigkeit aufgenommen werden können. Die Düngung erfolgt aber in der Regel ganzflächig, was bedeutet, dass nur ein geringer Teil der Düngermenge von der Tröpfchenbewässerung verfügbar gemacht wird. Abhilfe kann hier, zumindest bei der Stickstoffversorgung, die Zugabe von Harnstoff in das Bewässerungssystem schaffen.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbrieue oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbrieue
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

oder per E-Mail: leserbrieue@spektrum.de

Die vollständigen Leserbrieue und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbrieue

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook

www.spektrum.de/facebook

YouTube

www.spektrum.de/youtube

Google+

www.spektrum.de/googleplus

twitter

www.spektrum.de/twitter

Erratum

»Die schnellsten Bewegungen von Lebewesen«, Februar 2016, S. 20

In der Tabelle auf S. 24, rechte Spalte (Beschleunigungsangaben), ist leider ein systematischer Druckfehler aufgetreten:

Die jeweils rechts neben der 10 stehende Ziffer ist ein Exponent und muss hochgestellt werden. Die korrekten Angaben lauten 10^6 , 10^6 , 10^5 , 10^3 und 10^2 . Wir bitten, das Versehen zu entschuldigen.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

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

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, 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 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 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. Ingrid Horn,

Dr. Rainer Kayser, Christine Kemmet, Dr. Susanne Lipps-Breda,

Dr. Andreas Nestke, Klaus Volkert.

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80,

70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366,

E-Mail: spektrum@zenit-presse.de,

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-;

im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten

(gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland:

€ 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement

(Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank

Stuttgart, IBAN: 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 das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbrieue zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562

Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven

Inchcoombe, Executive Vice President: Michael Florek



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



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

DIE EXTRAKTION

VON REBECCA ROLAND

Gwen hasste diesen Teil der Arbeit: Einem neuen Zeugen die Erinnerungen zu extrahieren.

Die Frau saß ihr gegenüber in dem Zelt, das die Chicagoer Polizei hastig neben dem Ort der Schießerei errichtet hatte. Sie schwieg, stand offenbar unter Schock, war mit Blut bespritzt. Die Tasse Kaffee vor ihr hatte sie nicht einmal angerührt. Gwen war froh, dass der Kaffeeduft den säuerlichen Geruch von Blut und Angstschweiß wenigstens teilweise überdeckte.

Sie überflog das Protokoll. Der Name der Zeugin war Meghan Johnson. Sie war jung. Ein hübsches Gesicht. Sie trug einen einfachen Ehering.

Der Extraktor stand auf dem Tisch, dazu Sender und Empfänger, beide an ein Haarnetz erinnernd. Das grüne Licht signalisierte Betriebsbereitschaft.

Gwen räusperte sich. Wie sollte sie die Zeugin ansprechen? Frau Johnson? Nein, das würde sie an den Mann erinnern, der eigentlich neben ihr sitzen sollte, und außerdem klang es förmlich.

»Meghan?«

Die junge Frau saß bewegungslos da, wie eine Statue.

»Meghan«, wiederholte Gwen lauter.

Die Angesprochene zuckte zusammen, sah auf. Sie schwankte ein wenig, dann antwortete sie mit tonloser Stimme: »Ja.«

»Es wird Zeit.« Gwen nahm den Extraktor, trug ihren Stuhl um den Tisch herum und setzte sich neben Meghan.

Die machte große Augen. »J-etzt?«

»Ich fürchte, ja. Je schneller ich Ihre Erinnerung an das Verbrechen abrufe, desto besser ist die Qualität der Daten. Das ist entscheidend, wenn es zum Prozess kommt.« Sie nahm Meghans Hand. Eiskalt.

»Und Sie müssen es nie wieder erleben. Ich rufe die Erinnerung ab – und lösche sie dann.« Das war das Beste an dem ganzen Vorgang. Wer wollte nicht vergessen, wie er misshandelt wurde oder wie er mit ansehen musste, wie ein geliebter Mensch starb?

»Wird es dann leichter?«, fragte Meghan. »Durch das Löschen?«

»Es hilft.«

»Sprechen Sie aus Erfahrung?«

Gwen zögerte. Sie hatte den Extraktor selbst ausprobiert: Um sich besser in die Opfer einfühlen zu können, hatte sie zunächst die Erinnerung an eine Strafe für überhöhte Geschwindigkeit gelöscht. Anschließend kamen weitere unangenehme Erlebnisse an die Reihe – Zurückweisungen in der Schule etwa oder die meisten Gespräche mit ihrer ewig nörgelnden Mutter. Sie wusste zwar, dass all das geschehen war, aber es belastete sie nicht länger. Wenn sie mit ihrer Mutter sprach oder einen

schlechten Arbeitstag hatte, tröstete sie sich damit, dass sie das einfach verschwinden lassen konnte. Der Extraktor wirkte wie ein paar Gläser Wein: Man fühlte sich angenehm schläfrig und benommen, alle Probleme entschwandten in weite Ferne.

»Ja, eigene Erfahrung.«

Die Augen von Meghan schimmerten feucht. »Tun Sie's.«

Gwen ließ sie das Protokoll unterschreiben, während sie erst ihr, dann sich selbst ein Netz aufsetzte und anpasste. Anschließend tippte sie Befehle und Parameter ein. Nun kam der schwierigere Teil.

Als Gwen in Meghans Gedächtnis eintauchte, fand sie sich neben einem gut aussehenden Mann wieder. Sie saßen auf einer Decke im Park, nur wenige Meter entfernt von der Bühne, auf der eine Jazzband spielte. Gwen trat innerlich einen Schritt zurück und überprüfte die Szene. Alle Details waren scharf – beispielsweise Meghans Erinnerung an die zwei Frauen, die sich vor ihr im Takt der Musik wiegten, oder die gelben Lampen über dem fernen Fußweg. Sehr gut. Meghan war eine hervorragende Zeugin, und Gwen konnte nun mit ihren Augen deutlich sehen, wie der Schütze herankam und das Feuer eröffnete. Gwen zuckte unter dem Netz zusammen.

Dann kam der Augenblick, als Meghan sich über ihren Gatten beugte. Aus seinem Mund quoll Blut und ergoss sich über das weiße Hemd.

Er griff nach Meghan. Sie hielt seine Hände. »Liebe ... dich«, keuchte er.

»Ich liebe dich auch«, schluchzte Meghan wieder und wieder, bis sein Blick erstarrte.

Die Extraktion stoppte. Gwen wunderte sich, wie ruhig ihre Hände blieben, während sie die Bilder und Töne in den Datenspeicher übertrug und für das Gericht versiegelte.

Meghan hingegen zitterte wie eine Erfrierende. Gwens Finger verharrte zögernd über der Löschtaste. »Sind Sie bereit für das Entfernen der Erinnerung?«

Meghan schwieg.

»Sie müssen nie mehr sehen, wie er erschossen wird. Weder in Ihren Erinnerungen noch in Ihren Alpträumen.«

Meghan rang die Hände im Schoß. »Sie entfernen alles?«

»Alles.«

»Können Sie mir nicht seine letzten Worte lassen?«

»Das geht nicht. Tut mir leid.«

»Ich behalte es.«

»Was?« Vor Überraschung hätte Gwen fast die Löschtaste betätigt.

»Ich behalte es«, flüsterte Meghan. »Vorher hatten wir über eine Hypothek gesprochen. Ich will nicht, dass das sei-

ne letzten Worte sind, an die ich mich erinnere. Ich behalte es.«

»Überlegen Sie sich das gut!«

Meghans verweinte Augen hielten Gwens Blick stand. »Der Schmerz ist auszuhalten, wenn ich weiß, dass sein letzter Atemzug eine Liebeserklärung war.«

Widerstrebend schaltete Gwen das Programm aus und nahm den Extraktor von Meghans Kopf. Niemand hatte jemals zuvor eine Löschung verweigert. »Ich vermittele Ihnen einen Anwalt, wenn Sie wollen.«

»Ja, bitte.«

Gwen geleitete Meghan aus dem Zelt. Die Zeugin hielt den Kopf hoch und die Hände ruhig – das völlige Gegenteil des menschlichen Wracks wenige Minuten zuvor. Dann kehrte Gwen zurück, nahm den Extraktor und setzte das Netz auf. Normalerweise löschte sie Erinnerungen von Zeugen aus ihrem Gedächtnis. Wozu sich selbst damit belasten? Am Ende verliert man sonst den Verstand!

»An schlechten Erinnerungen kann nichts Gutes sein. Außer ...«

Sie blieb noch eine Weile sitzen, während sich ihr CSI-Team vor dem Zelt fragte, was da so lange dauere. Dann streifte sie mit feuchten Augen das Netz vom Kopf und verstaute den Extraktor wieder in seiner Tasche. 

DIE AUTORIN

Rebecca Roland ist Autorin der Fantasyserie »Shards of History« und der Kurzgeschichtensammlung »The King of Ash and Bones«. Ihre Homepage finden Sie unter rebeccaroland.net.

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 513, S. 454, 18. September 2014

Eine neue Phase der Exoplaneten-Forschung

Seit Beginn seiner Mission 2009 hat der Kepler-Satellit mehr als 1000 extrasolare Planeten aufgespürt. Doch Astronomen möchten mehr: Mit einer neuen Generation von weltraumbasierten Teleskopen werden sie ihre Suche in den nächsten Jahren massiv ausweiten. Besonders neugierig sind sie auf die atmosphärischen Eigenschaften ferner Welten und charakteristische Spuren von Leben.

HARVARD-SMITHSONIAN CENTER FOR ASTROPHYSICS (CFA) / DAVID AGUIAR



Raum und Zeit durch Quantenverschränkung?

Nach Einstein ist Gravitation gekrümmte Raumzeit – doch wie passt das zu den übrigen, quantenmechanisch beschriebenen Wechselwirkungen? Einige Theoretiker versuchen nun, Raum und Zeit durch ein altbekanntes Quantenphänomen zu beschreiben: die Verschränkung.

Giftiges Trinkwasser

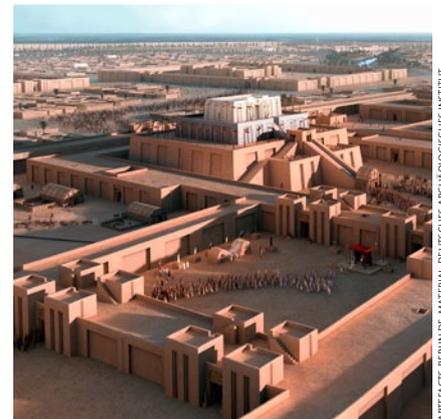
Arsenvergiftungen durch Brunnenwasser bedrohen Millionen von Menschen in Asien. Schuld daran sind tiefe Bohrungen, mit denen man verdrecktes Oberflächenwasser umgehen will, sowie sich verändernde Grundwasserströmungen durch den hohen Wasserverbrauch der stark wachsenden Bevölkerung.



FOTOUA / ENQUISINE

Was dich nicht umbringt ...

Chemische Verbindungen, die Pflanzen zur Abwehr gegen Schädlinge produzieren, machen auch menschliche Zellen widerstandsfähiger. Das könnte sogar das Gehirn vor Krankheiten wie Alzheimer oder Parkinson schützen.



ARTIFACTS-BERLIN/DE.MATERIAL/DEUTSCHES ARCHÄOLOGISCHES INSTITUT

Die ersten Metropolen

Nirgendwo entwickelten sich so früh derart viele urbane Zentren wie in Mesopotamien, nirgends zuvor erreichten Verwaltung, Politik und Kultur eine solche Blüte.

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 ABO VON SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT
mit exklusiven Extras



VERPASSEN SIE
KEINE AUSGABE
DES MAGAZINS!

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK!



**1. »Meine kurze Geschichte«
von Stephen Hawking**

Zum ersten Mal lässt der Physiker sein ganzes privates und wissenschaftliches Leben Revue passieren – in einem Buch voller Weisheit und Humor.

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.

+ PÜNKTLICHE LIEFERUNG:

Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.

+ KEINE MINDESTLAUFZEIT:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.



**2. Kaweco Füllhalter
»CLASSIC Sport«**

Der »Kaweco Sport« im Taschenformat, ausgestattet mit edler Stahlfeder und Iridiumspitze für Tintenpatronen, ist der ideale Begleiter für unterwegs.

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/abo

E-Mail: service@spektrum.de



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



Georg von Holtzbrinck Preis für Wissenschaftsjournalismus

AUSSCHREIBUNG 2016

Der Preis wurde anlässlich des 150-jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, von der Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck 1995 ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle deutschsprachigen oder in deutschsprachigen Medien veröffentlichen Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemein verständlich sein und zur Popularisierung von Wissenschaft und Forschung, insbesondere aus den Bereichen Naturwissenschaft, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Print und ein Preis in der Kategorie elektronische Medien sowie ein Nachwuchspreis für Bewerber, die Jahrgang 1987 oder jünger sind, vergeben. **Der Preis in den Kategorien Print und elektronische Medien ist mit je 5.000 Euro dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 Euro dotiert.**

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis.

Bewerben Sie sich bis zum 1. April 2016 mit 3 Beiträgen (Print) bzw. 2-3 Beiträgen (Elektronische Medien) aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

KONTAKT

**Veranstaltungsforum
Holtzbrinck Publishing Group**

Taubenstraße 23, 10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20

Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de

www.vf-holtzbrinck.de

Die Auswahl der Preisträger erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (VORSITZ)

Vorsitzender der Geschäftsführung,
Holtzbrinck Publishing Group

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER

Sprecher der Unternehmensleitung,
Boehringer Ingelheim GmbH

ULRICH BLUMENTHAL

Redaktionsleiter „Forschung aktuell“,
Deutschlandfunk

UTA-MICAELA DÜRIG

Geschäftsführerin, Robert Bosch Stiftung GmbH

PROF. DR.-ING. MATTHIAS KLEINER

Präsident, Wissenschaftsgemeinschaft
Gottfried Wilhelm Leibniz e.V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER

Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

JOACHIM MÜLLER-JUNG

Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER

Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT und
Herausgeber, ZEIT Wissen

PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER

Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

RANGA YOGESHWAR

Moderator der ARD-Sendungen „Quarks & Co“,
„Wissen vor acht“ u. a.

