

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

MEDIZIN
Designer-
moleküle für
intelligente
Medikamente

JUNI 2015

6/15 Spektrum
DER WISSENSCHAFT

KLIMAWANDEL

**So bedroht sind die
Südseeinseln wirklich**

PHYSIOLOGIE

**Die verjüngende
Kraft von Blut**

ARCHÄOLOGIE

**Wer saß einst auf
Mykenes Thron?**

Leben auf Saturnmond?

Thermalquellen unter
der Eiskruste von
Enceladus entdeckt



Jetzt als Kombipaket im Abo: App und PDF

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



www.spektrum.de/abonnieren



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Darlene K. Taylor von der North Carolina Central University in Durham berichtet ab S. 26 über intelligente Polymere, die Wirkstoffe gezielt zum Krankheitsherd befördern.



Am Boden des Ozeans unter der Eiskruste des Saturnmonds Enceladus entdeckte der Planetenforscher **Frank Postberg** hydrothermale Quellen – und damit eine lebensfreundliche Umgebung (S. 32).



Was wird aus dem Schutz des Privatlebens im Zeitalter der globalen Vernetzung? Wie passen sich Institutionen an die digitale Transparenz an? Philosoph **Daniel C. Dennett** und Medienwissenschaftler **Deb Roy** entdecken ab S. 78 überraschende Parallelen zur Artenexplosion im Kambrium.

Digital total?

Dieses Buch hat mich beschäftigt: »Silicon Valley. Was aus dem mächtigsten Tal der Welt auf uns zukommt« von Christoph Keese. Der Autor studierte monatelang die Innovationskraft sowie die sozioökonomischen Folgen der Digitalisierung, welche Konzerne wie Google, Apple oder Facebook der Welt angedeihen lassen. Keese stößt einen doppelten Warnruf aus: Zum einen hätten Deutschland und Europa kaum eigene Karten im Spiel um die Märkte der Zukunft, deren Währung die Daten über das Konsum- und sonstige Verhalten jedes Einzelnen darstellt. Zum anderen müssten wir alle uns wappnen für ein Leben, in dem sogar unser Denken und Fühlen unaufhörlich von monopolistischen Datenkraken kartiert wird.

Die Digitalisierung bietet großartige Möglichkeiten, die wir bei »Spektrum« seit bald 20 Jahren für unsere Leserinnen und Leser nutzen: 1996 startete Redakteur Gerhard Trageser den Spektrum-Ticker, der Ihnen zwischen den Heften neue Studien aus der internationalen Forschung vorstellte; heute besuchen mehr als eine Viertelmillion Nutzer monatlich das Portal [Spektrum.de](#) und unsere Blogplattform [SciLogs.de](#). Das jeden Donnerstag erscheinende Digitalmagazin »Spektrum – Die Woche« bietet – wahlweise als App oder PDF – eine Einordnung der wichtigsten wissenschaftlichen Themen der letzten sieben Tage; in unserer 2014 gegründeten Digitalreihe »Spektrum kompakt« führen wir in so verschiedene Themen ein wie Autismus, Kernfusion oder Epigenetik; im April startete mein Kollege Thilo Körkel [SciViews.de](#), ein Portal für Wissenschaftsvideos. Und natürlich können Sie auch Ihr Heft längst digital beziehen. Zudem sind mehr als ein Dutzend Redakteure auf Twitter oder Facebook direkt ansprechbar für Anregungen oder Kritik.

Doch bei allen Chancen, die sich im Kleinen bieten und in die wir bei Spektrum viel Kreativität und Muße investieren, beobachte ich die Folgen der Digitalisierung im Großen auch mit Skepsis. Datenschutz und Privatsphäre stehen im 21. Jahrhundert zur Disposition. Wenn in der Cloud mehr Wissen über den Einzelnen verfügbar ist, als der Einzelne je über sich selbst erlangen kann, ist das ein ernstes Problem.

Wohin also führt das? Daniel C. Dennett und Deb Roy wagen ab S. 78 eine Prognose, indem sie die digitale Revolution mit der kambrischen Explosion vergleichen: Laut dieser Hypothese wurden die Meere vor rund 540 Millionen Jahren durch chemische Veränderungen viel lichtdurchlässiger. Die optische Transparenz ließ neue Lebensformen mit nie bekannten Techniken für Tarnung, Angriff und Verteidigung entstehen. Ob die Analogie trägt, mögen Sie selbst entscheiden. Dass die digitale Transparenz unserer Tage neue, mächtige Organisationsformen hervorbringen wird, die nicht nur herkömmliche Unternehmen, sondern sogar Regierungen ins Wanken bringen können, halte ich für plausibel. Das (Über-)Leben in einer Welt, in der alles digitalisiert wird, was digitalisiert werden kann, will gut gelernt werden.

Nachdenklich grüßt Sie
Ihr

Carsten Könneker

3 Editorial**6 Spektrogramm**

Riesiger Leerraum im All • Regen bremst Hurrikane • Kannibalismus in der Vorzeit • Warum die Finger knacken • Darmflora bei Indigenen • Spuren der Mondentstehung im Asteroidengürtel

9 Bild des Monats

Flussbett wechsel dich

20

DREAMTIME / CENORMAN

42

H. JOACHIM SCHLICHTING

44

ANDREAS TREPTE / CC-BY-2.5 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/2.5/LEGALCODE)

10 Forschung aktuell**Dunkle Materie in der Milchstraße?**

Hinweis ja – Beweis nein

Nützliche Viren im Darm

Viren können die Gesundheit ihres Wirts fördern

Abelpreis 2015

John Nash und Louis Nirenberg ausgezeichnet

Vereinte Lichtgegensätze

Ein raffinierter Trick bannt Welle und Teilchen zugleich auf ein Bild

SPRINGERS EINWÜRFE**Verschwenderische Transfusionen**

Blutkonserven einzusparen, lohnt sich auch aus medizinischer Sicht

BIOLOGIE & MEDIZIN

► 20 Verjüngendes Blut

Verbindet man den Blutkreislauf einer alten mit dem einer jugendlichen Maus, werden viele Gewebe des betagteren Tiers leistungsfähiger.

Megan Scudellari

SERIE »MEDIZIN DER ZUKUNFT« TEIL 2

► 26 Designermoleküle für intelligente Medikamente

Polymere, die auf äußere Reize hin ihre Eigenschaften ändern, bringen Wirkstoffe gezielt zum Krankheitsherd.

Darlene K. Taylor und Uddhav Balami

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

42 Transparenz durch Nässe

Farblose Textilfasern können Gewebe zu strahlendem Weiß verhelfen. Warum macht Wasser den Effekt zunicht?

H. Joachim Schlichting

MENSCH & KULTUR

► 44 Wer saß einst auf Mykenes Thron?

Trutzige Burgen und reiche Grabbeigaben sprechen für ein mykenisches Königtum – doch die Experten streiten noch.

Josef Fischer

51 Auf den Spuren Homers

Bisher war die Region von Sparta uninteressant für Mykene-Experten. Nun wurde eine Archäologin fündig.

Waltraud Sperlich

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

54 Hinrichtung mit Überraschung

Eine Behauptung wird dadurch wahr, dass sie einen inneren Widerspruch enthält.

Christoph Pöppel

► TITELTHEMA

LEBEN AUF SATURNMOND?

32 Heißes Wasser in der Tiefe des Enceladus

Frank Postberg und Thorsten Dambeck

In spektakulären Fontänen, die der eisige Saturnmond ins All sprüht, haben Forscher Silizium-Nanopartikel entdeckt. Sie belegen: Am Grund von Enceladus' Tiefenozean herrschen lebensfreundliche Bedingungen.



68



INSTITUTE / CLAIRE MARTINE

78



ZOHAR LAZAR

ERDE & UMWELT

► 68 Sind Inselstaaten akut gefährdet?

Übereilte Rettungsmaßnahmen können schaden.

Simon D. Donner

TECHNIK & COMPUTER

78 Die Folgen der digitalen Transparenz

Öffentlichkeit und Privatleben werden neu definiert.

Daniel C. Dennett und Deb Roy

85 Wissenschaft im Rückblick

Vom aztekischen Kalenderstein zu seltsamen Meteoriten

86 Rezensionen

Rolf Heilmann: Auch Physiker kochen nur mit Wasser • Peter Poschlod: Geschichte der Kulturlandschaft • Walter Mischel: Der Marshmallow-Test • Peter Bickle: Der Bauernjörg u. a.

94 Leserbriefe/Impressum

96 Futur III

Michael Adam Robson: Die Marionette

98 Vorschau

Titelmotiv: NASA / JPL / SSI / Cassini Imaging Team; Composing:

Spektrum der Wissenschaft / Claus Schäfer

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

KOSMOLOGIE

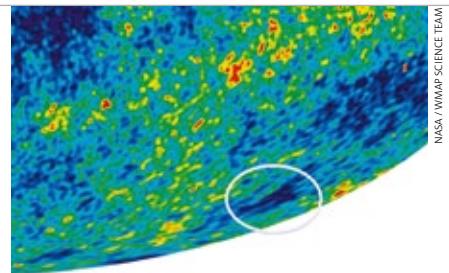
Riesiges kaltes Nichts im All

Physiker und Astronomen haben einen ungewöhnlich großen Leerraum im Kosmos entdeckt. Er hat einen Durchmesser von bis zu 1,8 Milliarden Lichtjahren und enthält entweder gar keine oder nur sehr wenige Galaxien. Typischerweise besitzen solche »Voids« nur einen Bruchteil dieses Durchmessers.

Das All ist gleichmäßig von der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung erfüllt. Sie gilt als Überbleibsel aus der Frühzeit des Universums. Die Raumsonden WMAP und Planck, die bis 2010 beziehungsweise 2013 in Betrieb waren, haben diese Strahlung für den gesamten Himmel kartiert. Demnach existiert ein Gebiet im Sternbild Eridanus, in dem die Temperatur des Mikrowellenhintergrunds um 70 millionstel Kelvin unterhalb des Durchschnittswerts liegt. Forscher um István Szapudi von der University of

Hawaii (USA) haben jetzt versucht, diesen kalten Fleck zu erklären. Sie erstellten eine Karte für die Verteilung der Galaxien. Dabei entdeckten sie im fraglichen Gebiet den riesigen Leerraum.

Wie dieser mit dem kalten Fleck zusammenhängt, lässt sich mit dem Sachs-Wolfe-Effekt erklären: Wenn die Photonen der Hintergrundstrahlung in ein Gebiet höherer Dichte eintreten, wirkt dessen Gravitationspotenzial auf sie wie eine Vertiefung, in die sie hineinfallen, wobei sie Energie gewinnen. Während sie das Areal durchqueren, dehnt sich das Universum aus, wodurch die Vertiefung gleichsam auseinandergezogen und flacher wird. Daher verlieren die Photonen beim Verlassen des Gebiets weniger Energie, als sie beim Eintritt erhalten haben. Umgekehrt bedeutet das: Passieren Photonen einen großen Leerraum, sind



Die Temperaturverteilung der Mikrowellenhintergrundstrahlung zeigt ein kaltes Gebiet (Kreis) im Sternbild Eridanus.

sie anschließend energieärmer (also kälter) als nach dem Durchqueren dichterer Regionen.

Allerdings erklärt der Sachs-Wolfe-Effekt allein die Temperaturabweichung von 70 millionstel Kelvin nicht vollständig. Dennoch sind die Wissenschaftler um Szapudi überzeugt davon, zwischen dem kalten Fleck im Sternbild Eridanus und dem Void bestehe ein Zusammenhang. Denn dass sich beide rein zufällig an derselben Stelle befinden, sei sehr unwahrscheinlich.

MNRAS 10.1093/mnras/stv488, 2015



Mehr Aktualität!

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

METEOROLOGIE

Regen bremst Hurrikane

Regentropfen nehmen Hurrikane bis zu ein Drittel ihrer Kraft, wie Tapan Sabuwala und seine Kollegen vom Okinawa Institute of Science and Technology (Japan) herausgefunden haben. Die Erkenntnis erklärt, warum die vorhergesagte Intensität von Wirbelstürmen in den meisten Fällen deutlich von der gemessenen Stärke abweicht.

In einem typischen Hurrikan fallen etwa zwei Kubikkilometer Regen pro Tag. Wie sich dies auf die Windgeschwindigkeiten auswirkt, war bisher kaum bekannt. Sabuwala und sein Team werteten deshalb Satelliten-daten der letzten 30 Jahre aus und verglichen die prognostizierte Intensität von Hurrikane mit den tatsächlich aufgetretenen Werten. Dabei stellten sie eine deutliche Abweichung fest.

Erst als sie in den Modellrechnungen, mit denen solche Stürme simuliert werden, die Reibung des Winds an den Regentropfen berücksichtigten, glichen sich Vorhersagen und gemessene Intensitäten an.

Die vielen Milliarden Liter Wasser, die pro Stunde in den zentralen Bereichen eines Hurrikans niedergehen, sorgen demzufolge dafür, dass die Windgeschwindigkeit dort durchschnittlich um 20 Prozent niedriger ausfällt. Bei besonders regenreichen Wirbelstürmen kann die Abschwächung sogar bis zu ein Drittel betragen. Die Forscher hoffen, dass ihre Ergebnisse künftig zu einer Verbesserung von Wetterprognosen und Krisenmanagement beitragen können.

Geophysical Research Letters
10.1002/2015GL063785, 2015

Kannibalismus in Englands Vorzeit

Eine genaue Untersuchung von 15 000 Jahre alten menschlichen Knochen hat Spuren von rituellem Kannibalismus zu Tage gefördert. Die Überreste wurden in der Gough's Cave gefunden, einer Höhle im Südwesten Englands, und stammen aus der Kulturstufe des Magdalénien (zirka 20 000 bis 12 000 Jahre vor heute). Sie gehörten einst zu mindestens sechs Individuen, darunter zwei Jugendlichen und einem Kind, und zeigen Schnitt-, Schlag- und Kauspuren. Die Schädel dienten sogar als Trinkgefäß. Wissenschaftler um Silvia Bello vom Natural History Museum in London sehen darin Belege für einen ritualisierten Totenkult mit dem Verzehren von Verstorbenen.

Gough's Cave ist einer der wichtigsten Fundorte für die Zeit des Magdalénien, obwohl die Höhle bereits 1880 entdeckt wurde und danach als Showattraktion diente. Neben Tier- und Menschenknochen haben Archäologen hier auch Werkzeuge und Artefakte ausgegraben. Die Gebeine der sechs Individuen zeigen laut Bello und ihren Kollegen klare Hinweise darauf, dass das Fleisch abgenagt und heruntergeschnitten wurde. Größere Knochen brach man auf, um an das Mark zu gelangen. Die Trinkgefäße aus Schädeln sind offenbar längere Zeit benutzt worden.

An den verschiedenen Überresten ähneln sich die Bearbeitungsspuren sehr stark. Daher nehmen die Forscher an, die Körper seien nach einem Routineverfahren zerteilt und zubereitet worden – ein Indiz für ritualisierten Totenkult.

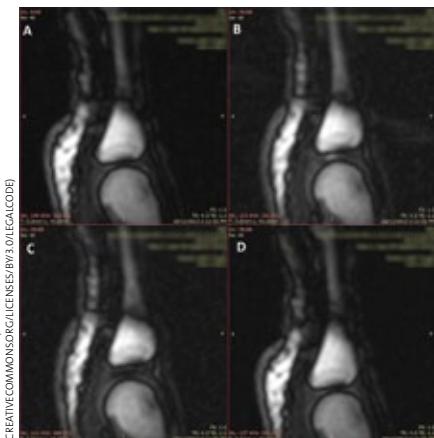
Funde aus anderen Ausgrabungsstätten stützen diese Vermutung. Die Verbreitung kannibalischer Bräuche im Magdalénien könnte auch erklären, weshalb Archäologen bislang kaum Gräber aus dieser Zeit gefunden haben.

ScienceDirect, 10.1016/j.jhevol.2015.02.016, 2015



THE TRUSTEES OF THE NATURAL HISTORY MUSEUM, LONDON

Menschen in der jüngeren Altsteinzeit benutzten mitunter Schädel als Trinkgefäß. Das belegen Funde wie dieser.



Diese Sequenz aus MRT-Aufnahmen zeigt, wie ein Fingergelenk unter Zugbelastung ruckartig auseinanderspringt (B und C).

Das Knackgeräusch, das beim Dehnen der Fingergelenke entsteht, geht mit der plötzlichen Bildung von

PHYSIOLOGIE

Warum die Finger knacken

Gasblasen im Gelenkspalt einher. Dies haben Forscher um Gregory Kawchuk von der University of Alberta (Kanada) entdeckt. Sie verfolgten den Vorgang mittels Echtzeit-Magnetresonanztomografie.

In dem Experiment legte ein männlicher Versuchsteilnehmer seine Hand in den Tomografen. Sodann zog eine Vorrichtung mit langsam zunehmender Kraft an einem Finger, während die Wissenschaftler laufend MRT-Aufnahmen vom Fingergelenk machten. Aus den Bilderserien geht hervor: Im Ausgangszustand hält die Gelenkflüssigkeit mit Hilfe von Adhäsionskräften das Gelenk in Position. Wird der Finger gedehnt, sind diese Kräfte ab einer

bestimmten Belastung nicht mehr groß genug, und das Gelenk springt ruckartig auseinander. Dadurch entsteht ein plötzlicher Unterdruck, weshalb sich eine Gasblase im Gelenkspalt bildet. Im selben Augenblick knackt der Finger.

Die Aufnahmen zeigen, dass die Blase auch danach noch vorhanden ist. Sie verschwindet typischerweise erst, wenn die Zugkraft auf den Finger nachlässt und sich der Gelenkspalt wieder verengt – ein lautloser Vorgang. Das Geräusch entsteht somit nicht durch den Kollaps der Blase, wie man bisher annahm.

*PLoS One
10.1371/journal.pone.0119470, 2015*

MIKROBIOLOGIE

Erstaunlich artenreiche Darmflora

Amerikanische Wissenschaftler haben eine isoliert lebende Gemeinschaft von Yanomami untersucht, der größten indigenen Volksgruppe im Amazonasgebiet. Dabei stießen sie auf eine überraschend große Vielfalt körpereigener Bakterien.



CMACALY / CC-BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSE/S/BY-NC-ND/LEGALCODE)

Eine Yanomami-Frau mit Kind. Die indigene Volksgruppe der Yanomami lebt im Grenzgebiet zwischen Venezuela und Brasilien und zählt etwa 35 000 Menschen.

Laut Genanalysen weist die Darmflora der Yanomami doppelt so viele mikrobielle Erbanlagen auf wie die von US-Amerikanern, ist also wesentlich differenzierter. Das untermauert die These, wonach Antibiotika, ausgeprägte Hygiene und der Verzehr von Fertigprodukten bei Menschen in westlichen Ländern die Artenfülle von Darm- und Hautbakterien verringert.

Ein Mitglied des Teams hatte Proben aus dem Mund, von der Haut und aus dem Kot von 34 Bewohnern des kleinen Dorfs in Venezuela entnommen. Die Siedlung war 2008 vom Helikopter aus entdeckt worden und zuvor in der westlichen Welt unbekannt. Soweit man weiß, hatten die Yanomami bislang keinen Kontakt mit modernen Medikamenten wie Antibiotika.

Die Wissenschaftler um Jose C. Clemente von der Icahn School of Medicine at Mount Sinai (New York) waren nicht nur von der großen Diversität des Yanomami-Mikrobioms überrascht. Sie stellten zudem erstaunt fest, dass die Darmflora der Indigenen einige Erbanlagen enthält, die Resistenzen gegen natürliche und synthetische Antibiotika vermitteln. Offenbar erwerben die Mikroben entsprechende Abwehrmechanismen auch ohne anthropogenen Gebrauch antibiotischer Arzneistoffe.

Science Advances 1, e1500183, 2015

PLANETENFORSCHUNG

Prägte die Mondentstehung den Asteroidengürtel?

Das Ereignis, das den Erdmond hervorbrachte, hat möglicherweise heute noch sichtbare Spuren im Asteroidengürtel hinterlassen, berichten Forscher um William Bottke vom Southwest Research Institute (USA). Astronomen gehen mehrheitlich davon aus, dass der Mond bei einem Zusammenprall zwischen der Uerde und einem etwa marsgroßen Himmelskörper entstand. Vermutlich ereignete sich dieser vor etwa 4,5 Milliarden Jahren, wie Analysen von Mondgestein ergeben haben. Bei der Kollision müssen Unmengen von Material ins All geschleudert worden sein. Bis zu zehn

Milliarden kilometergroße Bruchstücke könnten dem Schwerkraftfeld der Erde entwichen sein, ergeben die Berechnungen von Bottke und seinen Kollegen.

Etliche Brocken, so die Annahme der Forscher, könnten sodann mit Himmelskörpern im Asteroidengürtel kollidiert sein – mit Geschwindigkeiten um zehn Kilometer pro Sekunde. Dabei seien heftige Stoßwellen freigesetzt worden, die das Asteroidengestein

stark erhitzten, worauf es sich zum Teil in Glas verwandelte. Zudem sei das Edelgas Argon aus dem erwärmten Material verdampft. Argon entsteht großteils beim radioaktiven Zerfall von Kalium-40-Isotopen und reichert sich deshalb mit der Zeit in Gesteinen an, die solche Isotope enthalten.

Tatsächlich lassen sich in vielen Steinmeteoriten, die aus dem Asteroidengürtel stammen, Schmelzeinschlüsse und dunkle Glasadern nachweisen. Und das Argon-Kalium-Verhältnis in diesen Meteoriten deutet auf eine starke Erhitzung vor etwa 4,5 Milliarden Jahren hin. Das stimmt sehr gut mit dem mutmaßlichen Entstehungszeitpunkt des Monds überein. Allerdings ist noch fraglich, ob die untersuchten Meteoriten typisch für den gesamten Asteroidengürtel sind.

Science 348, S. 321–323, 2015

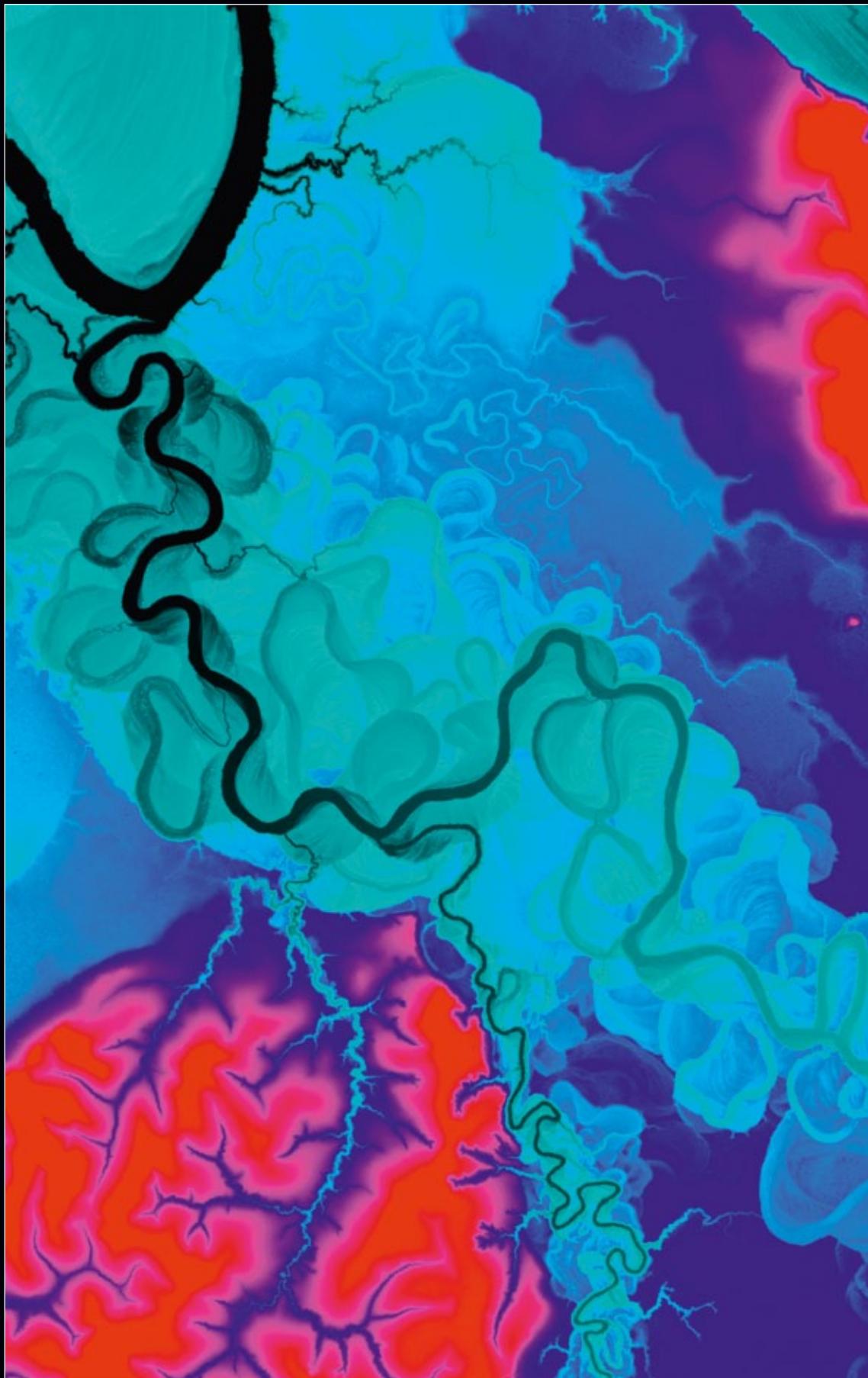
Diesen Meteoriten, der wohl aus dem Asteroidengürtel stammt, durchziehen dunkle Glasadern. Hier schmolz das Gestein beim Durchgang einer Stoßwelle.



QUINCZHUYIN/UNIVERSITY OF CALIFORNIA, DAVIS

FLUSSBETT WECHSEL DICH

Die Falschfarbenaufnahme zeigt die Windungen von Nebenarmen des Tambopata in Peru, eines Zuflusses des Amazonas. Tieferes Wasser ist schwarz dargestellt, in Blau- und Grüntönen zeichnen sich verlandete Fluss schlungen des stark mäandrierenden Gewässers ab. Höher gelegene Regionen sind rot. Das Bild entstand mittels einer Kombination von LIDAR (eine dem Radar verwandte Methode, die mit Laserstrahlen arbeitet) und Spektroskopie.



GREGORY ASNER, CARNEGIE INSTITUTION FOR SCIENCE

Dunkle Materie in der Milchstraße gefunden – oder doch nicht?

Die Milchstraße wirbelt zu schnell, das wollen Wissenschaftler nun bestätigt haben. Doch ihre Arbeit erntet Kritik. Und die Behauptung, sie beweise die Existenz der Dunklen Materie in unserer Galaxie, ist vorschnell.

von Jan Hattenbach

Auch unsere unmittelbare kosmische Umgebung soll große Mengen Dunkler Materie enthalten – das jedenfalls berichteten Anfang Februar Fabio Iocco vom Institut für theoretische Physik der Universität São Paulo, Miguel Pato, tätig an der Technischen Universität München und der Universität Stockholm, sowie Gianfranco Bertone von der Universität Amsterdam (*Nature Physics* 11, S. 245–248, 2015). Für die Mehrzahl der Astrophysiker wäre das keine überraschende Erkenntnis. Ohne die Dunkle Materie läuft nichts im All. Sie bestimmt das Wachstum und die Entwicklung der Galaxien, ist zentraler Bestandteil im Standardmodell der Kosmologen. Doch obwohl der mysteriöse Stoff, aus dem sich immerhin rund 80 Prozent der Masse des Universums zusammensetzen sollen, für viele eine ausgemachte Sache zu sein scheint, ist seine Existenz nach wie

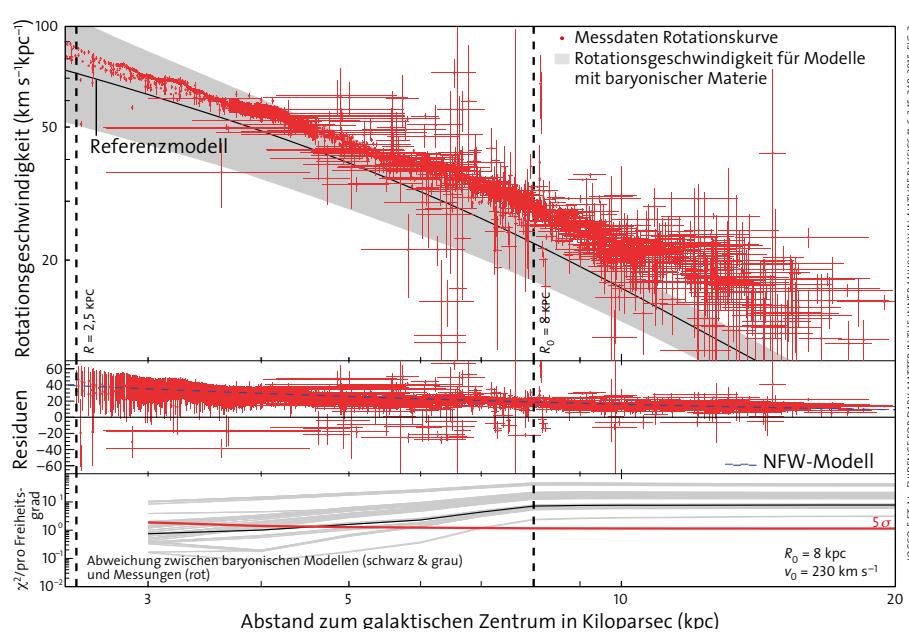
vor eine Hypothese, die ihrer Bestätigung harrt. Kein Experiment konnte bisher ein Dunkle-Materie-Teilchen zweifelsfrei nachweisen. Tatsache ist: Die baryonische, also uns in Form von Atomen und freien Elementarteilchen vertraute Materie reicht bei Weitem nicht aus, um die Gravitationskräfte in Galaxien zu erklären.

Auch nicht in unserer Milchstraße. Um das herauszufinden, trugen die drei Wissenschaftler Daten der Bewegung von Sternen und Gaswolken um das Milchstraßenzentrum zusammen und erstellten daraus die Rotationskurve unserer Galaxis (siehe die beiden Bilder). Beim Vergleich dieser gemessenen Kurve mit theoretisch berechneten Rotationskurven, zu denen allein die in der Milchstraße verteilte baryonische Materie die Gravitation beisteuert, stellten sie fest: Keines der baryonischen Modelle passt – auch in der Gal-

axis wirbelt die Materie schneller, als diese erklären könnten.

Die Forscher wandten damit eine bewährte Untersuchungsmethode auf die Milchstraße an, die in den 1970er Jahren die Idee der Dunklen Materie erst hoffähig machte. Damals hatte die amerikanische Astronomin Vera Rubin erkannt, dass sich praktisch alle fernen Spiralgalaxien schneller drehen, als dies durch ihre sichtbare Materie zu erklären ist. Dieses Rotationskurvenproblem, in den Jahrzehnten danach vielfach bestätigt, dient seither als Kronzeuge für die Existenz einer dunklen – weil unsichtbaren – Materiekomponente, die für die zusätzliche Beschleunigung der Galaxien verantwortlich ist. Die Alternative, ein modifiziertes Gravitationsgesetz (bekannt unter dem Sammelbegriff »modified Newtonian dynamics«, kurz MOND), hat in der Wissenschaftergemeinde nur wenige Fürsprecher.

Die Grafik zeigt die Abweichung der gemessenen Rotationsdaten (rot, mit Fehlerbalken) von der Voraussage der einsteinschen Gravitation in Verbindung mit der Verteilung der baryonischen Materie (grauer Bereich). Die Messwerte beginnen ab einem Abstand von etwa 6 Kiloparsec (20 000 Lichtjahr) zum galaktischen Zentrum von den Vorhersagen abzuweichen – die Materie dreht sich schneller, als durch gewöhnliche Materie allein zu erklären ist. Ein aus numerischen Simulationen stammendes Dunkle-Materie-Profil (Navarro-Frenk-White, NFW) ist als blaue gestrichelte Linie den Residuen (Differenz zu Referenzmodell) überlagert und scheint den Messwerten zu folgen. Eine mathematische Ausgleichsrechnung erfolgte jedoch nicht.



Anders als ferne Galaxien sehen Astronomen die Milchstraße von innen heraus. Sowohl ihre Kenntnis der Materieverteilung als auch der Rotationskurve unserer Galaxie sind daher bisher mit großen Unsicherheiten behaftet – es ist schließlich auch einfacher, einen Stadtplan anhand von Luftbildern zu zeichnen als von einem Zimmerfenster aus. Iocco und seine Kollegen vollbrachten nun eine Fleißarbeit: Wie die Teile eines Puzzlespiels fügten sie historische und neue Datensätze, die in den vergangenen Jahren verfügbar geworden waren, zusammen und leiteten daraus eine Rotationskurve ab, die erstmals auch die Bereiche der inneren Galaxie abbildet.

Doch belegt ihre Studie wirklich die Existenz der Dunklen Materie, wie die Autoren behaupten? Und bezieht sie sich tatsächlich auf das »Herz« oder den »Kern« der Milchstraße, wie in vielen Medienberichten zu lesen war?

Eine Reihe von Forschern, darunter Vertreter der MOND-Hypothese, bemängeln die in der Fachzeitschrift »Nature Physics« veröffentlichte Arbeit: Ihr Resultat sei weder neu noch auf methodisch einwandfreie Weise zu Stande gekommen, schreiben die Kritiker um Stacy McGaugh von der Case Western Reserve University im US-Bundesstaat Ohio in einem kurzen, polemischen

Aufsatz, der auf dem Preprint-Server ArXiv abrufbar ist. Man könne nicht einfach unterschiedlichste Datensätze kombinieren. Zudem sei die »innere Galaxie« überhaupt nicht untersucht worden – wobei dieser Begriff in der medialen Berichterstattung weiter zugespitzt wurde. So sprach eine Pressemitteilung der Technischen Universität München sogar von »dunkler Materie im Herzen der Milchstraße«.

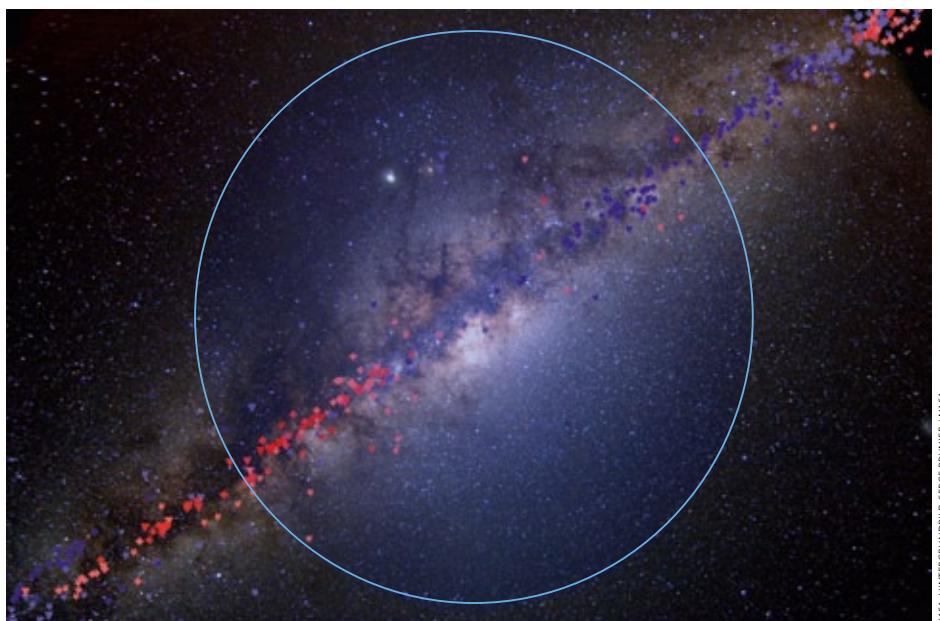
Eine Frage der Definition

Das lieferte zwar griffige Schlagzeilen, führt jedoch in die Irre. Denn eine in diesem Fall nahe liegende Interpretation für das »Herz« der Galaxie (ein wissenschaftlich nicht definierter Begriff) wäre zum Beispiel der zentrale, etwa 20000 Lichtjahre durchmessende »Milchstraßenbauch«, eine sphärische Verdichtung aus vor allem älteren Sternen. Diesen Bereich betrachteten die Forscher in ihrer Untersuchung in der Tat nicht, liefern allerdings auch einen plausiblen Grund dafür. Hier dominiert nämlich in jedem Fall die baryonische Materie. Stattdessen definierten Iocco und seine Kollegen die Bahn der Sonne um das Milchstraßenzentrum als Grenze der »inneren Milchstraße« – diese umfasst einen Raumbereich von rund 56000 Lichtjahren Durchmesser. Das ist gut die Hälfte der etwa 120000 Lichtjahre

durchmessenden galaktischen Scheibe. Es überrascht also nicht, dass die Autoren selbst nicht von »Herz« oder »Kern« sprechen.

In diesem Bereich, genauer ab einem Zentrumsabstand von 20000 Lichtjahren, zeigt sich die erwähnte Abweichung der Rotationskurve – und damit in einem Bereich, in dem sich unser Sonnensystem befindet. Das aber sei Literaturwissen, schreiben McGaugh und seine Mitstreiter. Es sei lange bekannt, dass die baryonische Materie allein nicht für die gesamte auf die Sonne wirkende Gravitationskraft verantwortlich sein könnte – zumindest nach den derzeit bekannten Gravitationsgesetzen. Auch James Binney von der University of Oxford, Experte für die Dynamik und Modellierung von Galaxien und an McGauchs Gegenrede nicht beteiligt, teilt diese Kritik: »(Iocco et al.) tragen nichts zum Kenntnisstand der Rotationskurve, der Struktur der galaktischen Scheibe oder des galaktischen Halos bei«, so Binney. »Es ist absurd, dass ihre Arbeit zur Veröffentlichung akzeptiert wurde.«

Den Nachweis eines handwerklichen Fehlers liefern die Kritiker allerdings nicht. Auch den Vorwurf, ihr Ergebnis bringe keine neuen Erkenntnisse, weisen Iocco und sein Team in einer Erwiderung zurück: Ihre Studie unterschei-



Eine Vielzahl einzelner Messpunkte diente dazu, die bislang vollständigste Rotationskurve der Milchstraße zusammenzustellen. Die Punkte sind hier einer optischen Aufnahme der inneren Milchstraße überlagert: Sterne, Sternhaufen und Gaswolken, beobachtet in unterschiedlichen Wellenlängen. Blaue Punkte nähern sich der Sonne, rote entfernen sich von ihr. Der Bereich im blauen Kreis symbolisiert die Verteilung von Dunkler Materie, wie die Autoren sie sie anhand ihrer Arbeit vermuten.

NASA/HINTERGRUND: SERGE BRUNIER / NASA

de sich signifikant von anderen Untersuchungen, die sich nur auf die direkte Sonnenumgebung bezogen. Doch egal, wer in diesem Streit letztlich Recht hat – einen »überzeugenden Beweis« (convincing proof) für die Existenz Dunkler Materie in der Milchstraße, wie in der Arbeit angekündigt, können Iocco und seine Mitstreiter schon deswegen nicht liefern, weil es den strengen, endgültigen Beweis in der Naturwissenschaft nicht gibt. Naturwissenschaftler sammeln einen wachsenden Haufen von stützenden Belegen, welche eine Hypothese möglichst bestätigen und nicht widerlegen. Wie schon Rubins Arbeiten vermag auch die neue Studie allenfalls einen Bedarf an zusätzlicher Gravitation zu belegen, ohne den Verursacher dingfest zu machen.

Aber ist die bisher nicht erklärbare Komponente der Schwerkraft nicht schon Beleg genug für die Existenz des dunklen Stoffs? Nur wenn man eben diese Existenz *a priori* voraussetzt. An keiner Stelle überprüfen die Autoren nämlich, ob die von ihnen zusammengestellte Rotationskurve zu Modellen hypothetischer Dunkle-Materie-Verteilungen passt oder ob MOND vielleicht doch eine bessere Erklärung bereithält. Zwar vergleichen Iocco, Pato und Bertone die Vorhersage eines in der Literatur beschriebenen Dunkle-Materie-Mo-

dells mit ihrer Rotationskurve und stellen fest, dass es augenscheinlich zu passen scheint. Eine mathematische Ausgleichsrechnung führen sie aber nicht durch – ihr den Begriff »dark matter« auf drei Druckseiten 25-mal verwendender Aufsatz enthält damit keinen ernsthaften Versuch, die Dunkle Materie als Auslöser der beschleunigten Rotation zu überführen.

Auflösung später

Auf Nachfrage gibt Fabio Iocco zwar zu, dass die Arbeit keinen direkten Nachweis für oder gegen die Dunkle Materie bietet, hält seine Schlussfolgerungen aber dennoch für gerechtfertigt. Die Evidenz dafür werde in einem demnächst online erscheinenden Aufsatz nachgereicht (Stand zu Redaktionsschluss). Diese bislang nur intern zirkulierende Studie beruhe auf dem gleichen Datensatz wie die bereits veröffentlichte und spreche stark gegen MOND.

Eine eigenwillige Veröffentlichungspolitik, mit der die Autoren die hohen Erwartungen enttäuschen, die schon der Titel ihrer »Nature Physics«-Publikation weckt. Auch im Artikel selbst schwächen sie ihre anfangs gemachten Aussagen in der Zusammenfassung ab. Hier ist nicht mehr von Evidenz oder gar Beweis die Rede, sondern nur noch

von Hinweisen auf die »Existenz eines Beitrags zum Gravitationspotenzial der Galaxie von einer unsichtbaren, diffusen Komponente« unbekannter Natur.

Gut möglich, dass die Dunkle Materie tatsächlich diese »unsichtbare Komponente« ist. Vor allzu starken Aussagen jedoch sollte man sich hüten. Um die aktuellen Messungen zu erklären, »können wir nicht mehr tun, als eine fehlende Gravitationskraft im einsteinschen Sinn nachzuweisen«, meint James Binney, der wie die Mehrheit der Fachleute nicht viel von den Alternativen zur Dunklen Materie hält: »Es gibt eine Vielzahl alternativer Theorien, aber es ist alles andere als einfach, aus ihnen genaue Vorhersagen zu extrahieren, die mit der Dynamik des Sonnensystems, der Strukturbildung im Kosmos, der Beobachtung von Gravitationslinsen und so weiter konsistent sind.« Dunkle Materie bleibt die bestmögliche Erklärung für die fehlende Gravitation im Kosmos, doch auch sie hat Schwächen. Die wichtigste: Wir kennen ihre Teilchen nicht. Solange das so ist, bleibt die Dunkle Materie, was sie ist – eine Hypothese. Bewiesen ist nichts.

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

MIKROBIOM

Nützliche Viren im Darm

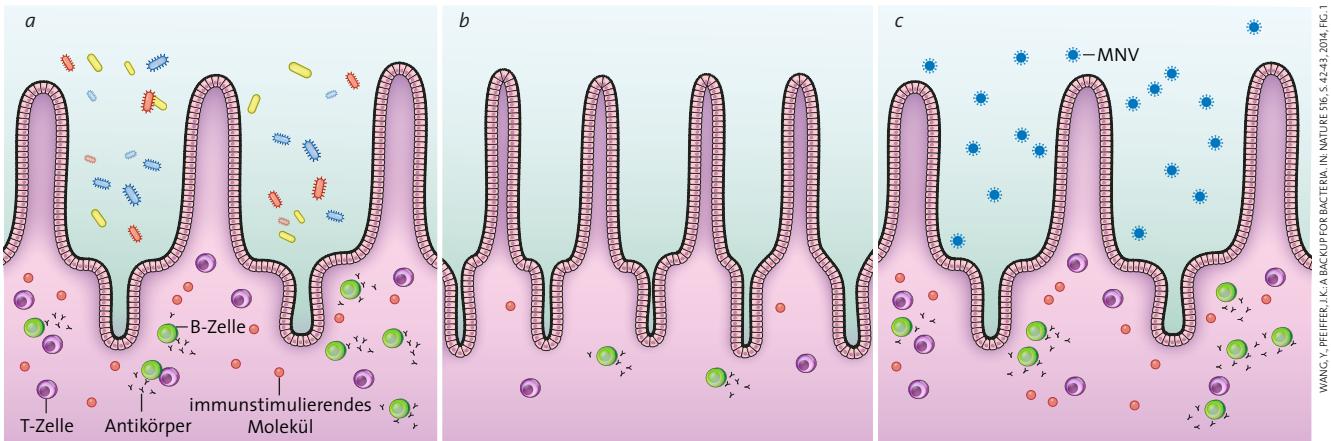
Bestimmte Viren sind in der Lage, die unterstützende Rolle von Darmbakterien in Säugetieren zu übernehmen. Viren müssen also nicht immer gefährlich sein – sie könnten sogar die Gesundheit ihres Wirts fördern.

VON YAO WANG UND JULIE K. PFEIFFER

Eine reiche Vielfalt an Mikroorganismen, darunter Bakterien, Archaeabakterien, Pilze und Viren, bevölkert den Verdauungstrakt von Säugetieren. Darmbakterien nutzen dem Wirt, indem sie ihn bei der Nahrungsverwertung unterstützen, die Entwicklung von Immunzellen vorantreiben und vor Schädigungen schützen. Es ist jedoch

unklar, ob andere Teile des Mikrobioms eine ähnliche Rolle übernehmen. Viren sind dabei noch relativ wenig erforschte Mitglieder der mikrobiellen Darmflora. Im Säugetierdarm gelten sie generell eher als gesundheitsschädlich. Doch kürzlich hat Elisabeth Kernbauer von der New York University School of Medicine zusammen mit ihren Kollegen

gezeigt: In Abwesenheit von Darmbakterien fördern Säugerviren die Homöostase, also die Aufrechterhaltung eines gesunden Gleichgewichts im Verdauungstrakt, und schützen ihn vor Schädigungen sowie Krankheitserregern (*Nature* 516, S. 94–98, 2014). Viren im Säugetierdarm könnten also dem Wirt in manchen Fällen durchaus nützen.



WANG Y, PFEIFFER L-K, A BACKUP FOR BACTERIA IN NATURE 516 S. 424-3, 2014, FIG. 1

Im Darm normaler Mäuse findet sich eine vielfältige Population von Mikroorganismen (links). Dazu gehören Bakterien, welche die Gewebsarchitektur aufrechterhalten und die Entwicklung von Lymphozyten (T- und B-Zellen) vorantreiben. Letztere produzieren Antikörper und andere Moleküle, die das Immunsystem stimulieren. Mäuse ohne Mikrobiom haben einen veränderten Darmauf-

bau, zum Beispiel dünnerne Zotten sowie eine eingeschränkte Lymphozytentwicklung (Mitte). Dadurch sind sie anfälliger für Verletzungen und bakterielle Erreger. Eine ähnliche Situation tritt bei Mäusen auf, die mit Antibiotika behandelt wurden. Die Infektion solcher Tiere mit dem Mäuse-Norovirus (MNV) kann die korrekte Struktur und Immunfunktion des Darms wiederherstellen (rechts).

Die Gesamtheit der im Darm vorkommenden Viren – das intestinale Virom – umfasst solche, die Bakterien infizieren (Bakteriophagen), Archaeaviren, Pflanzenviren und Säugerviren. Bakteriophagen gibt es reichlich, während sich Säugerviren nur gelegentlich nachweisen lassen. Letztere umfassen pathogene Viren, die nach Ausheilen der Krankheit im Körper verbleiben; harmlose Arten, die oft auch bei gesunden Individuen vorkommen; sowie bislang nicht genauer charakterisierte, deren Nukleinsäuresequenzen mit jener bekannter Viren nur wenig übereinstimmen.

»Keimfreie« Mäuse

Ein recht verbreitetes Mitglied des intestinalen Mäusevioms ist das Mäuse-Norovirus (MNV), von dem mehrere Stämme in Tierforschungseinrichtungen entdeckt wurden. Es ruft in Nagern mit einem funktionierenden Immunsystem im Allgemeinen keine Symptome hervor, wohingegen einige immungeschwächte Mäuse durch es erkranken. Die Forscher um Kernbauer untersuchten anhand von drei repräsentativen MNV-Stämmen, ob sich die Homöostase des Verdauungstrakts durch Viren beeinflussen lässt. Dazu verwendeten sie »keimfreie« Mäuse,

denen das natürliche Mikrobiom fehlt. Der Mangel an nützlichen Bakterien führt zu Veränderungen des Darms und einer fehlerhaften Entwicklung von Lymphozyten, einer Gruppe wichtiger Immunzellen. Mit Antibiotika behandelte Mäuse zeigen ebenfalls solche Anomalien. Kernbauer und ihre Kollegen wiesen nach, dass eine Infektion mit MNV viele dieser Defekte beheben konnte (siehe Grafik).

Zum Beispiel erlangten die ungewöhnlich dünnen Zotten (Ausstülpungen der Schleimhaut) ihre normale Dicke zurück. Die Paneth-Zellen der Darmwand produzierten wieder die übliche Menge an Granula mit antimikrobiellen Stoffen. Zudem normalisierte sich die Anzahl an CD4- und CD8-positiven T-Zellen (zwei Lymphozytentypen), deren Produktion immunstimulierender Moleküle, die Menge an Antikörpern sowie die Population angeborener lymphoider Zellen, einer weiteren Klasse intestinaler Immunzellen. So konnte ein einziger Virustyp viele Beeinträchtigungen beseitigen, die durch das Fehlen von Bakterien in keimfreien und antibiotikabehandelten Mäusen entstanden.

Dieses Virus scheint also einige Aufgaben des Mikrobioms zu ersetzen. Aber können dann virale Infektionen

keimfreien Mäusen auch dabei helfen, Krankheiten, Verletzungen oder Infektionen mit pathogenen Bakterien zu bekämpfen? Um das zu testen, hat das Team um Kernbauer normale und mit Antibiotika behandelte Mäuse mit einer den Darm schädigenden Chemikalie behandelt und untersucht, ob sich die Anzahl überlebender Tiere durch eine MNV-Infektion ändert. Ergebnis: Durch die Chemikalie starben mehr antibiotikabehandelte als herkömmliche Nager, jedoch verbesserte eine MNV-Infektion das Überleben Ersterer. Ebenso war eine Infektion mit krankheitserregenden Bakterien nach Antibiotikabehandlung schädlicher als ohne, aber eine virale Infektion minderte wiederum die Symptome dieser Mäuse. Somit kann eine MNV-Infektion das Mikrobiom funktionell ersetzen und den Gesundheitszustand der Tiere verbessern.

Zwar werden intestinale Säugerviren generell als schädlich für den Wirt angesehen, doch haben bereits frühere Studien einen positiven Effekt viraler Infektionen in anderem Zusammenhang nachgewiesen. Zum Beispiel können Herpesviren bakterielle Infektionen unterdrücken, und Retroviren waren an der Evolution der Plazenta beteiligt. Weitere nichtpathogene Viren im Verdauungstrakt dürften in »kom-

mensalen« Gemeinschaften vorkommen, in denen sich das Virus vermehrt, ohne den Wirt zu schädigen, oder sogar in mutualistischen Verbindungen, von denen beide – Virus und Wirt – profitieren. Zukünftige Untersuchungen müssen ermitteln, wie häufig und dauerhaft diese Viren im Mikrobiom zu finden sind, in welchen Säugetieren sie vorkommen und was sie bewirken.

Weiterhin offen bleibt die Frage, ob intestinale Säugerviren dem Wirt auch im Rahmen einer normalen Darmflora nützen. Kernbauers Studie untersuchte den positiven Effekt von MNV an Mäusen, denen ein Mikrobiom fehlt oder die mit mehreren Antibiotika behandelt wurden. Vielleicht würde der Vorteil eines intakten Mikrobioms den Nutzen einer therapeutischen Virus-

infektion überdecken. Bereits bekannt ist jedoch, dass ein bestimmter darin vorkommender Bakterientyp (»segmented filamentous bacteria«) Entzündungsreaktionen fördert. Ähnlich spezifische Effekte könnten daher auch gewisse intestinale Viren hervorrufen, sogar in einem gesunden Wirt mit einem normalen Mikrobiom. In der Tat beobachtete das Team um Kernbauer, dass die drei eng verwandten MNV-Stämme leicht unterschiedliche Reaktionen in den keimfreien Mäusen auslösten – also sehr spezifisch wirkten.

Könnten intestinale Säugerviren am Ende vielleicht als Probiotika nützlich sein? Beim Menschen können Darmentzündungen auf den Gebrauch von Antibiotika, genetische Anlagen und andere Faktoren zurückgehen. In man-

chen Fällen heilen Fäkaltransplantationen eines gesunden Spenders – im Prinzip eine Übertragung eines intakten intestinalen Mikrobioms – solche Krankheiten. Vielleicht könnten bestimmte Darmviren ebenfalls Symptome lindern. Zudem beruht der Nutzen von Fäkaltransplantationen möglicherweise auf Viren innerhalb der Spenderproben. Zukünftige Studien des intestinalen Vioms sollten Antworten auf diese Fragen liefern.

Yao Wang und **Julie K. Pfeiffer** forschen am Department of Microbiology der University of Texas Southwestern Medical Center in Dallas.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 516, S. 42–43, 4. Dezember 2014

MATHEMATIK

Abelpreis für John Nash und Louis Nirenberg

Die Norwegische Akademie der Wissenschaften vergibt den mit einer knappen Million Euro dotierten Preis an die beiden Mathematiker »für ihre herausragenden und bahnbrechenden Beiträge zur Theorie der nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen und ihre Anwendungen in der geometrischen Analysis«.

von CHRISTOPH PÖPPE

Abelpreis für John Nash? Das mag auf den ersten Blick aussehen wie ein 20 Jahre alter Druckfehler. Nash hat 1994, gemeinsam mit Reinhard Selten und John Harsanyi, den Wirtschaftsnobelpreis erhalten (Spektrum der Wissenschaft 12/1994, S. 25–33), und das nach ihm benannte Nash-Gleichgewicht ist mittlerweile ein zentrales Konzept der Spieltheorie. Sein tragisches Schicksal ist durch das Buch »A Beautiful Mind« von Sylvia Nasar (Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 106–107) und vor allem durch den gleichnamigen Film einem breiten Publikum bekannt geworden: Nash erkrankte 1959 an Schizophrenie und verbrachte 30 Jahre in geistiger Umnachtung, bis er Anfang der 1990er Jahre wie durch ein Wunder wieder daraus erwachte.

Es ist aber kein Druckfehler. Nash ist in erster Linie Mathematiker und hat selbst seine spieltheoretischen Arbeiten stets als Nebensache angesehen. Eigentlich befasste er sich mit partiellen Differentialgleichungen.

Ein Genie – auch nach den Maßstäben des Courant Institute

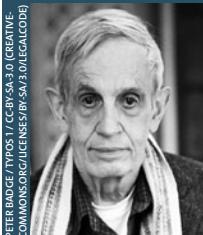
Dasselbe Arbeitsgebiet hat auch sein Mitpreisträger Louis Nirenberg; aber kurioserweise haben die beiden nie eine gemeinsame Arbeit veröffentlicht. Immerhin hatten sie ungefähr ein Jahr lang engen Kontakt an der New York University.

Nirenberg hatte 1945 dort nur vorgesprochen, um sich für ein Masterstudium zu bewerben. Bei den Professoren Richard Courant und Kurt Friedrichs

hinterließ er jedoch einen so nachhaltigen Eindruck, dass sie ihm auf der Stelle einen Assistentenjob anboten.

Nashs Karriere hatte bereits einen steilen Aufschwung genommen, als er im akademischen Jahr 1956/1957 in New York war – inoffiziell. Eigentlich war er Professor am MIT und hatte für ein Freijahr (»sabbatical«) eine Stelle in Princeton. Aber wie Nirenberg in einem Interview erzählte, »hing er einen großen Teil der Zeit am Institut herum«, weil seine Freundin und spätere Ehefrau Alicia in New York lebte.

Während Nashs eindrucksvolle Karriere durch seine Erkrankung plötzlich abbrach, stieg Nirenberg zu einer zentralen Figur des Instituts auf, das unter dem Namen Courant Institute of Mathematical Sciences weltberühmt wur-



PETER BADDE / TYPOM / CC-BY-SA 3.0 (CREATIVE COMMONS-LICENZENSBY-SA 3.0 LEGALCODE)



NY PHOTO BUREAU / HOLLENSEAD

John Forbes Nash (links), geboren am 13. Juni 1928 in Bluefield (West Virginia), promovierte mit 21 Jahren an der Princeton University über nichtkooperative Spiele; in seiner Dissertation führte er das später nach ihm benannte Gleichgewicht ein. Nach verschiedenen Stationen, unter anderem am Massachusetts Institute of Technology, ging er ans Institute for Advanced Study in Princeton, das ihm auch während seiner langen Krankheit eine Arbeitsstätte bot und an dem er noch heute tätig ist.

Louis Nirenberg, geboren am 28. Februar 1925 in Hamilton (Ontario, Kanada), promovierte 1949 an der New York University über das weylsche Einbettungsproblem der Differenzialgeometrie. Aus seinem damaligen Institut ging das Courant Institute of Mathematical Sciences hervor. Dort verbrachte Nirenberg seine ganze mathematische Karriere bis zu seiner Emeritierung 1999; von 1970 bis 1972 war er Direktor des Instituts.

de, und verbrachte dort sein ganzes wissenschaftliches Leben. Allgemein gepriesen wird seine überaus kooperative Grundeinstellung. So haben – für einen Mathematiker ungewöhnlich – mehr als 90 Prozent seiner wissenschaftlichen Arbeiten einen Koautor.

Nirenberg kennt zweifellos die gesamte Fachwelt, und seine Institutskollegen waren großenteils Weltklassemathematiker. Vor diesem Hintergrund ist seine Antwort auf die Frage,

ob er irgendwelche Fachkollegen für Genies halte, bemerkenswert: »Da fällt mir einer ein, und das ist John Nash.«

Das gemeinsame Arbeitsgebiet der Preisträger ist eigentlich in der Physik beheimatet. Partielle Differenzialgleichungen betreffen eine zeit- und ort-abhängige Größe wie etwa Temperatur, Dichte oder Geschwindigkeit eines beweglichen Mediums. Das physikalische Gesetz, dem diese Größe gehorcht, liegt in Form einer Differenzialgleichung

vor, das heißt als Beziehung zwischen der Größe selbst und ihren räumlichen wie zeitlichen Veränderungen. Daraus will man zum Beispiel das zukünftige Verhalten des Mediums ermitteln, wenn sein Zustand zu einem Anfangszeitpunkt bekannt ist. Ein Paradebeispiel ist die Navier-Stokes-Gleichung der Strömungsdynamik (Spektrum der Wissenschaft 4/2009, S. 78–87).

Nash und Nirenberg gerieten allerdings auf völlig anderem Weg an diesen



ERWEITERN SIE IHREN HORIZONT.
UND ZWAR INS UNENDLICHE.

JETZT IM
MINIABO
KENNEN LERNEN*

In *Sterne und Weltraum* erfahren Sie monatlich alles über Astronomie und Raumfahrt.
***Drei aktuelle Ausgaben von *Sterne und Weltraum* für nur € 5,33 je Heft (statt € 8,20 im Einzelkauf)**

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743 | www.sterne-und-weltraum.de/miniabo

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

Nie ist es kälter als draußen: Das Maximumprinzip

Wie stellt sich die Temperatur innerhalb einer Hauswand ein, die außen der Kälte ausgesetzt ist, von innen beheizt wird und vielleicht gegen den Boden so isoliert ist, dass keine Wärme durchdringt?

Auf die Dauer kommt es nicht darauf an, wie warm die Wand war, bevor der Frost einsetzte und die Hausbewohner die Heizung aufdrehten. Wenn die »Randbedingungen« – die Temperaturen auf der Außen- und der Innenseite – konstant bleiben, stellt sich durch die Wärmeleitung im Inneren der Wand ein sehr gleichmäßiges Temperaturgefälle ein. Insbesondere ist es an keinem Punkt der Wand wärmer als drinnen oder kälter als draußen.

Das physikalische Gesetz, das die Wärmeleitung beschreibt, lässt sich durch die folgende partielle Differentialgleichung ausdrücken:

$$\partial u / \partial t = c \Delta u$$

Die zeitliche Ableitung der Temperatur u ist gleich einem Koeffizienten c , der die Wärmeleitfähigkeit des Materials angibt, mal der Summe der zweiten Ableitungen nach allen Raumrichtungen. Dieser Term $\Delta u = \partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2 + \partial^2 u / \partial z^2$ beschreibt, wie sehr die Temperatur an einem Ort vom Mittelwert derselben in der unmittelbaren Umgebung dieses Ortes ab-

weicht – mit negativem Vorzeichen. Die Wärmeleitungsgleichung drückt also aus, dass sich u an jedem Ort in Richtung einer Angleichung an den lokalen Mittelwert verändert.

Auf die Dauer strebt eine Lösung der Wärmeleitungsgleichung gegen einen Gleichgewichtszustand. Dann gilt $\Delta u = 0$ (die »Laplace-Gleichung«), und die Temperatur ist an jeder Stelle ein solcher lokaler Mittelwert. Insbesondere kann es keinen Punkt geben, an dem die Temperatur höher ist als in seiner ganzen Umgebung – es sei denn, die Umgebung ist unvollständig, weil der Punkt sich am Rand des Gebiets befindet. »Eine Lösung der Laplace-Gleichung nimmt ein Maximum höchstens am Rand an.« Das ist das so genannte Maximumprinzip – das man ebenso gut Minimumprinzip nennen könnte, denn auch einen Kältepol im Inneren des Gebiets kann es nicht geben.

In der üblichen Klassifikation der partiellen Differentialgleichungen gehört die Laplace-Gleichung zu den elliptischen Gleichungen, die Wärmeleitungsgleichung jedoch zu den parabolischen. Eine dritte Klasse, die hyperbolischen Differentialgleichungen, beschreibt in erster Linie Schwingungs- und Wellenphänomene; auch in ihnen kann der Delta-Operator vorkommen, muss es aber nicht.

Gleichungstyp. Nash arbeitete an dem Problem der »isometrischen Einbettung«: Ist es möglich, ein Stück der Ebene knitterfrei und ohne Risse derart zu deformieren, dass es die Gestalt einer vorgegebenen gekrümmten Fläche annimmt? Nash konnte zeigen, dass die Antwort – unter sehr milden Voraussetzungen – Ja lautet. Dazu musste er das Problem durch eine partielle Differentialgleichung beschreiben und beweisen, dass eine Lösung existiert und die geforderten Eigenschaften besitzt.

Sein Beweis enthielt zwar ein Verfahren, mit dem man im Prinzip dieser Lösung beliebig nahekommen konnte; aber von der Gestalt der Lösung konnte man sich kein klares Bild machen. Erst jüngst haben Vincent Borrelli und seine Kollegen das nachgeholt und damit erhebliches Aufsehen erregt (Spektrum der Wissenschaft 1/2015, S. 44–52).

Nirenberg arbeitete ebenfalls an einem Einbettungsproblem aus der Differentialgeometrie, und zwar an einer Vermutung von Hermann Weyl: Ist es möglich, eine Hohlkugel (»Sphäre«) so auszubeulen, dass die deformierte

Sphäre an jedem Punkt eine vorgeschriebene Krümmung aufweist? In seiner Dissertation konnte Nirenberg diese Frage mit Ja beantworten.

Ausgleichende Wirkung

Die beiden genannten Einbettungsprobleme laufen auf elliptische partielle Differentialgleichungen hinaus; in ihnen spielt typischerweise der so genannte Delta-Operator oder auch Laplace-Operator die dominierende Rolle. Für eine Funktion f ist Δf die Summe der zweiten Ableitungen nach allen Raumrichtungen (siehe Kasten). Kommt dieser Ausdruck auf eine geeignete Art und Weise in einer Differentialgleichung vor, so wirkt er mäßigend auf die Lösung u der Gleichung. Denn schwankt u zu stark, dann wird Δu so groß, dass die Gleichung nicht mehr erfüllt sein kann. Entsprechend spielt der Delta-Operator eine entscheidende Rolle in allen Gleichungen, die Ausgleichsprozesse beschreiben. Neben der Wärmeleitung (siehe Kasten) sind dies in erster Linie die Diffusion und die Angleichung der Geschwindigkeiten in einem strömenden

Medium durch innere Reibung. Bei den oben genannten geometrischen Einbettungsproblemen sorgt der Delta-Operator dafür, dass die Lösung nicht beliebig knittig werden kann.

Physikalische Überlegungen führen auch zu elementaren Aussagen wie dem Maximumprinzip, das zunächst nur für die einfachsten elliptischen Gleichungen gilt: Eine Lösung der Laplace-Gleichung kann nicht größer sein als der größte Randwert und nicht kleiner als der kleinste. Nirenbergs Leistung besteht vor allem darin, das Maximumprinzip auf äußerst raffinierte Weise so zu verallgemeinern, dass man auch Lösungen allgemeinerer Gleichungen abschätzen kann. Vor allem seine Arbeit mit Shmuel Agmon und Avron Douglis von 1959 bis 1964 wurde zur Grundlage eines ganzen Forschungsgebiets.

Die ausgleichende Wirkung des Delta-Operators hält einer großen Vielfalt von Störungen stand. So entwickelt die mathematisch idealisierte Temperatur in einer Flüssigkeit oder einem Gas selbst dann keine Unstetigkeiten (sprunghafte Änderungen), wenn ein

heftiger Wind weht – vorausgesetzt, der Wind selbst ist nicht zu ungleichmäßig. Wenn jedoch die Störung nicht der Konvektionsgeschwindigkeit, sondern deren Quadrat proportional ist, gerät die Dominanz des Delta-Operators ins Wanken. Das ist der Fall bei der Navier-Stokes-Gleichung.

Diese ist schon deswegen schwierig, weil sie nichtlinear ist: Die Summe zweier Lösungen ist im Allgemeinen nicht wieder eine Lösung. Also gibt es auch kein Sortiment an Elementarlösungen, aus dem man mit geeigneten

Vorfaktoren jede beliebige Lösung zusammenaddieren könnte. Auch Nirenbergs schärfste Werkzeuge, die Abschätzungen, verlieren hier an Wirksamkeit.

Sogar Nirenberg konnte nicht ausschließen, dass eine Lösung der Navier-Stokes-Gleichung Singularitäten entwickelt: Unstetigkeiten oder, noch schlimmer, Punkte, an denen die Lösung den Wert unendlich annimmt. Immerhin zeigte er 1982 gemeinsam mit Luis A. Caffarelli und Robert V. Kohn, dass die Menge dieser singulären Punkte »vom Maß null« ist – was der Eigenschaft »ver-

nachlässigbar« schon ziemlich nahe kommt.

Mit diesem Ergebnis haben Nirenberg und seine Koautoren eine Marke gesetzt, die bis heute nicht übertrffen wurde – und das, obgleich es einen nicht unerheblichen Anreiz gibt, sich um wesentliche Fortschritte auf diesem Gebiet zu bemühen. Genau darauf hat das Clay Institute einen Preis von einer Million Dollar ausgesetzt.

Christoph Pöppé ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUANTENOPIK

Gegensätze des Lichts vereint

Licht besitzt sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter. Quantenmechanische Prinzipien verhindern jedoch, beides gleichzeitig zu beobachten. Schweizer Forschern gelang das Kunststück nun dennoch – zumindest indirekt.

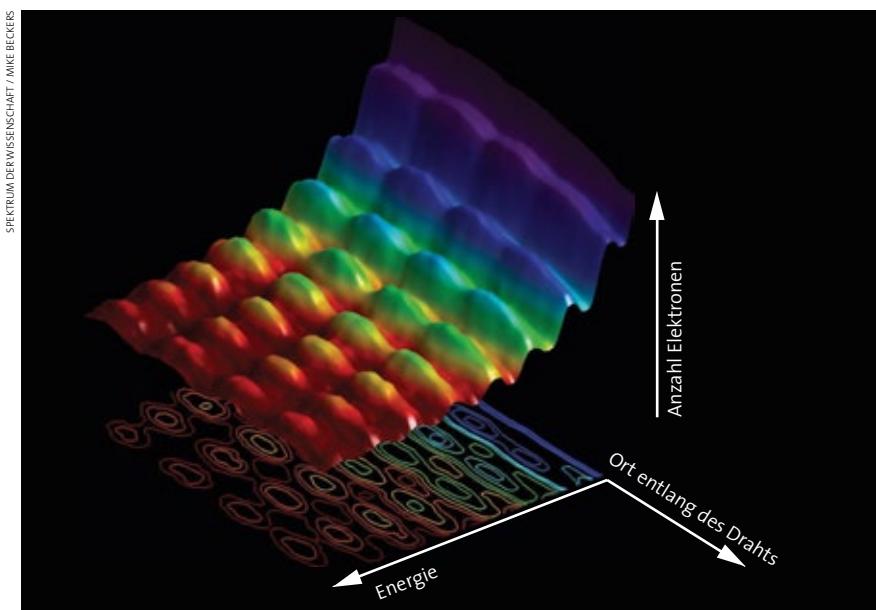
VON MARIA LUBS

Jahrhundertelang waren sich die Physiker über die Natur des Lichts uneinig. Auf der einen Seite stand der Niederländer Christiaan Huygens (1629–1695) mit dem nach ihm benannten Prinzip, das Licht als räumlich ausgedehnte Welle betrachtet. Auf der anderen Seite Isaac Newton (1643–1727), der

die Vorstellung vertrat, es bestehe aus einem Strom schneller Teilchen. Erst im 19. Jahrhundert brachten neue Experimente und die Theorie der Elektrodynamik scheinbar Klarheit: Demnach war Licht eine Welle. Doch Albert Einsteins Beobachtungen brachten das Bild erneut ins Wanken. Er beschrieb 1905 den

so genannten photoelektrischen Effekt, den er nicht mit der Wellenvorstellung in Einklang bringen konnte. Einstein schlussfolgerte, dass Licht doch aus Teilchen bestehen musste.

Die Forderung nach einer einheitlichen Theorie führte zur Idee des Welle-Teilchen-Dualismus. Dieses quanten-



Diese Aufnahme stellt zugleich einerseits die Welleneigenschaft von Licht dar – als stehende Welle entlang des Drahts (in diesem Ausschnitt sind davon vier Wellenberge sichtbar) –, andererseits seine Teilcheneigenschaft: Die regelmäßigen Abstände der einzelnen Maxima senkrecht zum Draht (dieser verläuft außerhalb des violettfärbten Bereichs) zeigen an, wie viel Energie einzelne Photonen bei Stößen auf die Elektronen übertragen haben.

Verschwenderische Transfusionen

Blutkonserven einzusparen lohnt sich auch medizinisch

Einsparungen im Gesundheitswesen sind ein heikles Thema, denn schnell entsteht der Verdacht, sie gingen auf Kosten des Wohls kranker Menschen. Doch nun hat sich herausgestellt, dass der restriktive Umgang mit einer lebenswichtigen Ressource die Heilungschancen von Krankenhauspatienten sogar verbessern kann.

Seit zu Beginn des 20. Jahrhunderts die unterschiedlichen Blutgruppen entdeckt und Verfahren zum Aufbewahren von Blutspenden entwickelt wurden, dienen Transfusionen als Routinemaßnahme gegen akuten Blutverlust oder chronische Blutkrankheiten. Im Zweiten Weltkrieg wurde massenhaft Blut gespendet, meist auf freiwilliger Basis, und auch heute herrscht zumindest in den wohlhabenden Teilen der Welt an Blutkonserven kein Mangel. In den USA finden jährlich gut 20 Millionen Transfusionen statt. Für Deutschland lag die entsprechende Zahl in den vergangenen Jahren bei fast 5 Millionen.

Das in den roten Blutkörperchen enthaltene Protein Hämoglobin sorgt für den lebenswichtigen Sauerstofftransport durch den Körper. Die Weltgesundheitsorganisation WHO hat einen Wert von mindestens 12 bis 13 Gramm Hämoglobin pro Deziliter Blut für gesund erklärt; aus diesem Grund entschieden sich Ärzte bisher in der Regel bei Werten von weniger als 10 für eine Transfusion. Doch im vergangenen Jahrzehnt haben mehrere umfangreiche Studien ergeben, dass auch sparsamere Verabreichungen den meisten Patienten nicht schaden. Viele Mediziner empfehlen seither Hämoglobingrenzen von 7 bis 8, und die Niederlande haben den Transfusionsgrenzwert schon 2000 auf 6,4 gesenkt. Das spart erhebliche Kosten ein, denn ein Liter konservierten Bluts, das unter anderem auf Erreger von Hepatitis C und Aids getestet werden muss, kostet rund 200 Euro.

Ein Team um den Hämatologen Lawrence Tim Goodnough vom Stanford University Medical Center (US-Bundesstaat Kalifornien) konnte 2014 belegen, dass weniger Transfusionen nicht nur dem Krankenhausbudget nützen, sondern auch den Patienten. Seit die Ärzte am Stanford Hospital per Computer an strengere Richtlinien erinnert werden, sobald sie Blutkonserven anfordern, ist die Anzahl der Transfusionen um 24 Prozent gesunken. Das brachte Einsparungen von 1,6 Millionen Dollar pro Jahr. Zugleich reduzierte sich die mittlere Aufenthaltsdauer der Transfusionspatienten von zehn auf sechs Tage, und ihre Sterblichkeit sank von 5,5 auf 3,3 Prozent (*Nature* 520, S. 24–26, 2015).

Offenbar können allzu freigiebig verabreichte Transfusionen mehr schaden als nützen. Das fremde Blut belastet das Immunsystem, aber die möglichen Folgen fallen bei einem ohnedies schwer Erkrankten nicht sofort auf; sie offenbaren sich erst als statistischer Effekt, wenn große Patientengruppen erfasst werden.

In Deutschland hat die Universitätsklinik Düsseldorf erfolgreich begonnen, Blutkonserven einzusparen. Das Pilotprojekt »Subito« analysiert in einem Schnellverfahren, welche Blutbestandteile – rote Blutkörperchen oder für die Gerinnung zuständige Blutplättchen – dem einzelnen Patienten tatsächlich mangeln. Dann erhält er gezielt die benötigte Komponente. Auf diese Weise spart die Uniklinik pro Jahr 5000 Blutkonserven ein.

Vielleicht kündigt sich in solchen Initiativen ein Paradigmenwechsel der Transfusionsmedizin an. Während man bisher den kranken Organismus mit Fremdblut geradezu überschwemmte, etabliert sich allmählich eine neue Disziplin, die Hämotherapie. Sie kompensiert spezifische Mängel, indem sie dem Kreislauf des Patienten gezielt die fehlenden Komponenten zuführt.

physikalische Prinzip schreibt Objekten grundsätzlich beide Eigenschaften zu. Will man sie beobachten, bestimmen die Umstände des Experiments, welche davon man misst. Licht zeigt sich also je nach Versuchsanordnung als Welle oder punktförmiges Teilchen – prinzipiell aber immer nur als eines von beidem.

Wissenschaftler von der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) in der Schweiz haben es nun geschafft, beide Eigenschaften des Lichts gleichzeitig in einer Aufnahme abzubilden (*Nature Communications* 6, 6407, 2015). Dazu verwendeten sie ein ultraschnelles Rastertransmissionselektronenmikroskop (scanning transmission electron microscope, STEM). Es beschleunigt Elektronen mit Hochspannungen von bis zu 200 Kilovolt. Dabei entsteht ein Elektronenstrahl, der die zu untersuchende Probe Punkt für Punkt abtastet. Die Elektronen durchdringen das Präparat und wechselwirken mit ihm, wodurch sie ihre Richtung oder ihre Energie verändern. Ein Detektor registriert schließlich die neuen Eigenschaften der Elektronen.

Lichtähnliche Elektronenwelle als Untersuchungsobjekt

Die EPFL-Forscher verwendeten als Probe einen rund 100 Nanometer dicken Silberdraht – ein Menschenhaar ist etwa 500-mal dicker. Auf ihn richteten sie einen Laser, der sehr kurze Lichtpulse liefert. Diese regen die freien Elektronen des Metalls an: jene Ladungsträger, die beim Anlegen einer Spannung den elektrischen Strom leiten. Die Elektronen beginnen nun zu schwingen und bilden eine Welle auf der Metalloberfläche, die als Oberflächen-Plasmon-Polariton (surface plasmon polariton, SPP) bezeichnet wird. Sie läuft auf dem Draht entlang und wird an dessen Enden reflektiert. Dabei ist die Drahtoberfläche gewissermaßen die Nulllage der Schwingung: Diese dringt also in das Metall ein und tritt aus ihm hervor. Auf Grund der Reflexion überlagern sich einfallender und rückläufiger Teil. Die Länge der Nanodrähte wählten die Forscher nun genau so, dass die größten



Michael Springer

Auslenkungen und die Nulldurchgänge der resultierenden Welle immer am gleichen Platz auf der Metalloberfläche blieben. Eine stehende Welle bildete sich – der eingestrahlte Laserpuls war auf dem Draht sozusagen gefangen. Weil SPP-Wellen in anderen Experimenten das gleiche Verhalten wie elektromagnetische Felder im freien Raum zeigen, betrachteten die EPFL-Wissenschaftler sie in ihrem Versuch kurzerhand als lichtähnliches Phänomen.

Um die SPPs zu untersuchen, beschossen die Forscher um Fabrizio Carbone die Nanofäden mit den energiereichen Elektronen ihres Mikroskops. Mit dem STEM lässt sich prinzipiell auf zwei Wegen darstellen, wie die Elektronen mit den Wellen auf dem Draht wechselwirken. Der erste ist eine räumliche Abbildung der untersuchten Probe, ähnlich einem Foto aus der Vogelperspektive. In diesem Fall ist die Wellenform der SPP auf der Drahtoberfläche zu sehen, also die Schwingungsbäuche und festen Null-

Möglichkeit. Um beide Eigenschaften gleichzeitig zu sehen, wählten sie einen Mittelweg. Sie richteten den Nanodraht gerade so aus, dass sie entlang dessen Längsachse mit dem STEM weiterhin die Wellenberge detektieren konnten. Auf der Achse senkrecht zum Draht konnten die Wissenschaftler nun aber zusätzlich die Energieverteilung aufnehmen. Das auf diese Weise gewonnene Bild gibt die beiden Detektionsmöglichkeiten gleichzeitig wieder. Es zeigt die beiden widersprüchlichen Eigenschaften des Lichts in einer einzigen Messung.

Neuer Blick auf fundamentale Eigenschaften

Damit ist Fabrizio Carbone und seinem Team gelungen, sowohl Wellen- als auch Teilchenaspekte eines elektromagnetischen Objekts auf ein Bild zu bannen. Doch genau genommen war ihr Untersuchungsobjekt eben keine Lichtwelle, sondern das durch den Laser hervorgerufene SPP-Muster auf dem

Um beide Merkmale des elektromagnetischen Felds gleichzeitig darzustellen, wählten die Wissenschaftler einen trickreichen Mittelweg

punkte. Die zweite Möglichkeit besteht darin, nur die Energie der STEM-Elektronen aufzunehmen. Während diese mit dem elektromagnetischen Feld wechselwirken, können sie Energie erhalten und abgeben, die allerdings auf Grund quantenmechanischer Regeln portioniert ist. Kollidiert ein Elektron mit einem Lichtteilchen des SPP-Felds, erhält es daher dessen komplette Energie, oder es gibt genau so viel ab, um ein weiteres Photon mit der gleichen Frequenz zu erzeugen. Die Energieverteilung auf dem Detektor weist als Ergebnis dieser Zusammenstöße also Maxima auf, die alle den gleichen Abstand haben, nämlich genau eine Photonenenergie. In solch einem Bild schlägt sich der Teilchencharakter des elektromagnetischen Felds nieder.

Die Forscher entschieden sich aber weder für die eine noch für die andere

Draht. Dessen teilchenartige Zusammenstöße mit dem Elektronenstrahl einerseits und die stehende Welle andererseits sind zwei verschiedene Eigenschaften des gleichen Gesamtsystems. Was auch bei diesem Experiment unmöglich bleibt, ist, den Wellen- und Teilchencharakter eines einzelnen Quantenobjekts gleichzeitig darzustellen. Dennoch demonstrierten die Forscher mit ihrer trickreichen Messmethode einen neuartigen Ansatz, die fundamentalen Eigenschaften von eingesperrten elektromagnetischen Feldern zu untersuchen und gezielt zu manipulieren. Sie liefert ein viel versprechendes neues Werkzeug für Materialwissenschaftler und Quantenoptiker.

Maria Lubs ist Physikerin und Wissenschaftsjournalistin in Potsdam.

THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT: **Spektrum KOMPAKT**

In den **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen finden Sie alle wichtigen Informationen zu einem bestimmten Themenkomplex als PDF-Download.

€ 4,99
je Ausgabe



Diese und weitere Kompaktausgaben erhalten Sie unter:

spektrum.de/kompakt

Verjüngendes Blut

Verbindet man den Blutkreislauf einer alten mit dem einer jugendlichen Maus, werden viele Gewebe des betagteren Tiers leistungsfähiger. Biologen untersuchen nun, woran das liegt und wie sich die Mechanismen nutzen lassen.

Von Megan Scudellari

Zwei Labormäuse sitzen nebeneinander und knabbern Trockenfutter. Als sich die eine etwas bewegt, wird klar: Sie teilen sich nicht nur die Nahrung, sondern sind von den Vorder- bis zu den Hinterläufen zusammengenäht. Unter der Haut sind beide sogar noch stärker verbunden, denn jede Maus pumpt auch das Blut der anderen durch ihre eigenen Adern.

Parabiose – das Wort stammt aus dem Griechischen und bedeutet so viel wie »Leben nebeneinander« – ist eine 150 Jahre alte chirurgische Technik, welche die Blutgefäßsysteme zweier Tiere miteinander vereint. Das ahmt eine gemeinsame Blutversorgung nach, wie sie manchmal auch natürlicherweise auftritt, etwa bei siamesischen Zwillingen oder in der Plazenta einer Schwangeren.

Im Labor untersuchen Forscher damit auf einzigartige Weise, was beim Transfer von Blutbestandteilen in ein anderes Lebewesen geschieht. Versuche mit parabiotischen Nagern führten vor einem halben Jahrhundert zu wichtigen

Erkenntnissen in der Endokrinologie, der Tumorphysiologie und der Immunologie. Aus nicht ganz eindeutigen Gründen hatte das Interesse an dieser Technik seit den 1970er Jahren nachgelassen.

In letzter Zeit wurden Wissenschaftler aber wieder auf sie aufmerksam, besonders solche, die sich mit dem Altern beschäftigen. Beim Zusammenschluss der Kreislaufsysteme einer alten und einer jungen Maus zeigte sich nämlich Erstaunliches: Ob Herz, Gehirn oder Muskeln – in fast allen Geweben scheint das jüngere Blut neues Leben in die alternden Organe zu bringen. Die Mäuseseniorinnen wurden stärker, schlauer, gesünder, und sogar ihr Fell glänzte wieder. Die Forscher suchen nun nach jenen Stoffen im Blut, die dafür verantwortlich sein könnten. 2014 begann in Kalifornien sogar eine Studie, um die Wirkung von Blutbestandteilen junger Spender auf ältere Alzheimerpatienten zu untersuchen. »Es ist ein Verjüngungsprozess«, meint der Neurologe Tony Wyss-Coray von der Stanford University in Kalifornien und Gründer der Firma, bei der die Studie läuft. »Wir starten die biologische Uhr neu.«

AUF EINEN BLICK

VERHEISSUNGSVOLLES ELIXIER

- 1** Umströmt junges **Blut** gealterte Gewebe, regt es die Zellteilung an und lindert vielfältige **Alterserscheinungen**.
- 2** Die Forscher vermuten, dass **Botenstoffe im Blutplasma** **Stammzellen** aktivieren. Welche Faktoren genau dafür sorgen, ist jedoch unklar.
- 3** Noch fehlen Untersuchungen, ob **Transfusionen** auch älteren Menschen helfen könnten. Wissenschaftler und Ethiker warnen vor überzogenen Versprechen und möglichen **Risiken**.

Großes Potenzial einer provokanten These

Viele seiner Kollegen sind vorsichtiger mit solchen Behauptungen. »Hier wird nicht das Alter der Tiere zurückgedreht«, kontert Amy Wagers. Die Stammzellforscherin arbeitet an der Harvard University in Cambridge, Massachusetts. Sie identifizierte einen Botenstoff im Blut junger Mäuse, der zur scheinbaren Verjüngung von Muskulatur führt. Doch ihrer Meinung nach verwandeln diese Faktoren nicht altes Gewebe in junges, sondern unterstützen lediglich die Reparatur von geschädigten Zellen. »Wir stellen einfach die normale



SANDUHR: DREAMSTIME / ANDREADONNETTI; BLUTBEUTEL: FOTOUA / OKSANA TRACHUK; COMPOSING: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CLAUS SCHÄFER

Forscher gehen ersten Hinweisen darauf nach, dass Transfusionen mit jungem Blut die biologische Uhr vieler Gewebe austricksen können und den Zeitpunkt verzögern, zu dem sie aufhört zu ticken.

Funktion wieder her.« Dabei betont sie, dass noch niemand überzeugend eine lebensverlängernde Wirkung von jungem Blut nachgewiesen hat. Vielleicht könnte es aber dazu beitragen, bei älteren Menschen Wunden nach Operationen besser heilen zu lassen, oder Alterserkrankungen mildern.

»Die These ist schon sehr provokant«, findet auch der Neurowissenschaftler Mark Mattson vom US National Institute on Aging in Bethesda, Maryland, der an den Arbeiten zur Parabiose nicht beteiligt war. Und fügt hinzu, nur halb im Scherz: »Die Diskussion gibt einem allerdings zu denken. Vielleicht sollte ich etwas Blut von meinem Enkel einlagern. Dann könnte mir eventuell geholfen werden, wenn mein Gedächtnis zu schwächeln beginnt.«

Die ersten dokumentierten Experimente zur Parabiose unternahm 1864 der französische Physiologe Paul Bert. In der Hoffnung, ein gemeinsames Blutkreislaufsystem zu erhalten, entfernte er Hautstreifen an der Flanke zweier Albino-ratten und nähte die Tiere anschließend dort zusammen. Den Rest erledigte die Natur: Der Wundheilungsprozess ließ Kapillaren wachsen, beide Tiere verbanden sich. Bei seinen Versuchen demonstrierte Bert, dass Flüssigkeit, die er in Venen des einen Tiers spritzte, in die andere Ratte übertrat. Für seine Arbeiten erhielt er im Jahr 1866 eine Auszeichnung der Pariser Akademie der Wissenschaften.

Einfache Operation – schwere Konsequenzen

Das Vorgehen hat sich seit damals nicht wesentlich geändert und wurde an verschiedenen Organismen wie Süßwasserpolypen, Fröschen und Insekten angewandt. Am besten funktioniert es aber bei Nagern; sie erholen sich von dem Eingriff schnell. Bis Mitte des 20. Jahrhunderts untersuchten Wissenschaftler verschiedene Phänomene mittels Parabiose von Mäusen oder Ratten. So zeigten sie beispielsweise, dass Karies nichts mit dem Blutzuckerspiegel zu tun hat. Hierzu verabreichten Forscher nur einer der parabiotischen Ratten Zucker. Nur bei dieser entwickelte sich die Zahnpulpa, obwohl die Glukose durch beide Körper gleichermaßen strömte.

Der Biochemiker und Gerontologe Clive McCay von der Cornell University im Staat New York war 1956 der Erste, der Phänomene des Alterns mit Hilfe von Parabiose untersuchte. Sein Team koppelte 69 Paare von Ratten unterschiedlichen Alters aneinander. Bei einem der Pärchen war ein ein- bis einhalb Monate alter Nager mit einem 16 Monate alten Tier verbunden – entsprechend etwa einem fünfjährigen und einem 47-jährigen Menschen. Die Experimente liefen mitunter grausam ab. So notierten die Autoren: »Wenn zwei Ratten nicht aneinander gewöhnt sind, nagt eine so lange am Kopf der anderen, bis dieser völlig zerfressen ist.« Außerdem verstarben allein elf Pärchen auf mysteriöse Weise. Diese so genannte Parabiose-Krankheit tritt etwa ein bis zwei Wochen nach dem Verbinden der Partner auf und beruht möglicherweise auf Abstoßungsreaktionen der Gewebe.

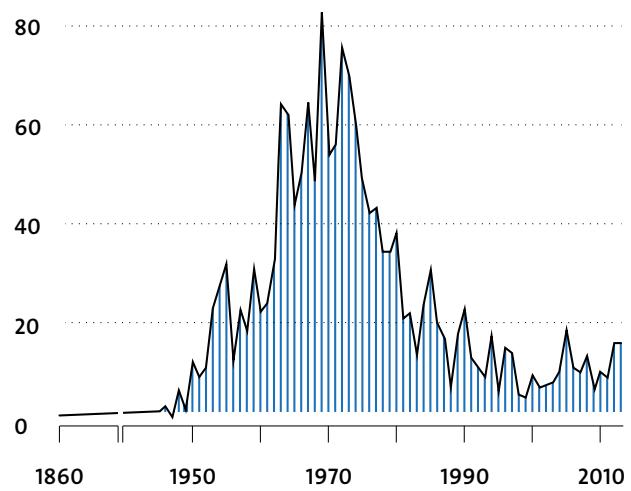
Heutzutage werden solche Studien behutsamer durchgeführt, um den Stress und die Sterblichkeit der Tiere zu verringern. »Wir beobachten die Mäuse vorab sehr lange und dis-

kutieren viel mit den Tierhaltungsgremien. Das nehmen wir nicht auf die leichte Schulter«, versichert der Neurologe Thomas Rando von der Stanford University. Vor den Versuchen werden zuerst Mäuse desselben Geschlechts und derselben Größe für zwei Wochen aneinander gewöhnt. Die Operation selbst geschieht unter sterilen Bedingungen und in Narkose; es werden Heizkissen eingesetzt, und Antibiotika sollen Infektionen vorbeugen. Außerdem scheint beim Einsatz genetisch reinerbiger Inzuchtmäuse die Parabiose-Krankheit auszubleiben. Nach der Operation verhalten sich die verkoppelten Mäuse normal, ihr Fress- und Trinkverhalten ist unauffällig, und sie lassen sich später auch wieder trennen.

Bei seinem ersten Parabioseversuch zu Alterungsprozessen koppelte McCay alte und junge Ratten 9 bis 18 Monate lang aneinander. Am Ende des Experiments hatten sich die Knochen des älteren Tiers hinsichtlich Gewicht und Dichte jenen des jüngeren angeglichen. 1972 untersuchten zwei Wissenschaftler von der University of California die Lebensdauer bei solchen Rattenpaaren. Die älteren Partner starben im Schnitt vier bis fünf Monate später als Kontrolltiere, was zum ersten Mal darauf hindeutete, dass jugendliches Blut das Leben verlängern könnte.

Trotz dieser faszinierenden Ergebnisse trat die Technik wieder in den Hintergrund. Die Gründe dafür sind unbekannt: Entweder versprach man sich davon keinen weiteren Erkenntnisgewinn, oder aber die Hürden der Genehmigung wurden zu hoch. Parabiotische Forschung blieb aus, bis der

Veröffentlichungen zur Parabiose

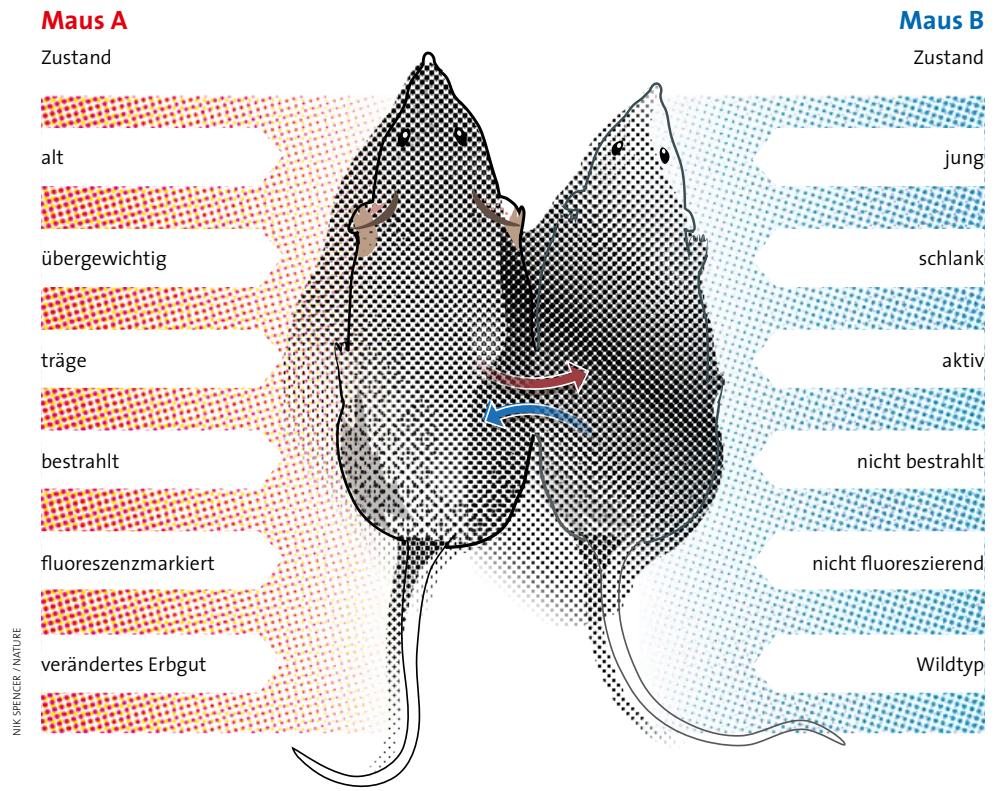


NATURE NACH EIGEL A. WISS-CRAT: A REVIEW OF PARABIOSIS IN BIOMEDICAL RESEARCH.
IN: SWISS MEDICAL WEEKLY 144, W13914, 2015, FIG. 1

In den 1960er und 1970er Jahren zeigten Wissenschaftler verstärktes Interesse an der Methode und publizierten viele Arbeiten (vertikale Achse), doch bald schon sank die Popularität der Parabiose wieder.

Folgenreiche Verbindung

Bei der Parabiose werden zwei Tiere von einem gemeinsamen Blutkreislauf versorgt. Hierzu verbinden Forscher sie chirurgisch und untersuchen den Einfluss verschiedener Blutbestandteile auf die Gesundheit beider Individuen.



Stammzellforscher Irving Weissman sie Jahrzehnte später wieder zu neuem Leben erweckte.

Schon 1955, mit 16 Jahren, hatte sich Weissman in der Kleinstadt Great Falls in Montana von einem Pathologen abgeschaut, wie man den Blutkreislauf von Mäusen miteinander verbindet. Sein Lehrmeister untersuchte so genannte Transplantations-Antigene: Proteine auf der Oberfläche von Zellen, die von einem Organismus auf einen anderen übertragen werden. Sie bestimmen, ob der Empfänger das Gewebe abstößt oder akzeptiert. Weissman erinnert sich, wie er beobachtete, dass ein in das Blut gespritzter Fluoreszenzfarbstoff zwischen den Tieren hin- und herfloss. »Das war wirklich verblüffend.«

Später untersuchte er drei Jahrzehnte lang die Stammzellen und die Geweberegeneration an Sternseescheiden, die von Natur aus als Parabionten leben. Im Jahr 1999 kam dann Amy Wagers als Postdoc in Weissmans Labor an die Stanford University und wollte untersuchen, wie Blutstammzellen sich fortbewegen. Weissman schlug ihr vor, die Zellen mit Fluoreszenzfarbstoffen zu markieren und parabiotische Mäuse zu verwenden. Damit gelangen Wagers schnell grundlegende Entdeckungen, und auch ihre Kollegen in Stanford wurden auf die Methode aufmerksam.

So stellte 2002 Irina Conboy aus Thomas Randos Labor eine von Wagers' Veröffentlichungen im Literaturseminar vor. Ihr Mann Michael war in derselben Arbeitsgruppe und döste während ihrer Präsentation hinten im Seminarraum.

Als er aber etwas von zusammengenäherten Mäusen hörte, horchte er auf. »Wir hatten jahrelang darüber diskutiert, ob Alterungsprozesse im gesamten Körper gleichzeitig ablaufen und ob alle Gewebe dann mehr oder weniger gemeinsam untergehen«, sagt er. Doch keiner konnte sich vorstellen, wie man experimentell untersuchen sollte, ob die einzelnen Vorgänge tatsächlich körperweit reguliert werden.

»Mäuse, die ihr Blut teilen – damit könnten wir vielleicht die Frage beantworten, die uns bereits seit Jahren beschäftigt«, dachte er damals. Am Ende des Seminars lief er zu Irina und Rando. Er hatte noch nicht einmal ausgeredet, da sagte Rando schon: »Versuchen wir es doch einfach.«

Schier unglaubliche Effekte

Die Forscher schlossen sich Wagers an, die passende Mäusepärchen auswählte und Michael die Methode der Parabiose beibrachte. Rando glaubte zu Beginn nicht wirklich an ein Gelingen des Experiments. Doch es funktionierte. Innerhalb von fünf Wochen regenerierten sich Muskel- und Leberzellen in der alten Maus unter dem Einfluss des jungen Bluts, wahrscheinlich indem ältere Stammzellen angeregt wurden, sich wieder zu teilen. Die Wissenschaftler stellten auch fest, dass die Gehirnzellen der alten Mäuse verstärkt wuchsen – Ergebnisse, die sie allerdings nicht in ihre Veröffentlichung im Jahr 2005 aufnahmen. Insgesamt lassen ihre Daten vermuten, dass bisher noch nicht nachgewiesene Faktoren im Blut das Altern der verschiedenen Gewebe steuern.

Viele Menschen hoffen auf Anti-Aging-Anwendungen. Doch die Datenlage rechtfertigt noch keinen Handel mit jungem Blut zu solchen Zwecken. Ethisch wäre er ohnehin bedenklich.

Nach der Veröffentlichung der Daten stand Randos Telefon nicht mehr still. Einige Anrufe kamen von Männermagazinen, die nach neuen Möglichkeiten zum Muskelaufbau suchten; andere kamen von Leuten, die fasziniert waren von der Aussicht, dem Tod ein Schnippchen zu schlagen, und nun unbedingt wissen wollten, ob junges Blut lebensverlängernd wirkt. Aber seit den ersten Hinweisen in den 1970er Jahren war das noch nie richtig getestet worden. Dazu wären sehr teure und arbeitsintensive Experimente nötig.

Stattdessen begannen einige Mitarbeiter des Teams unabhängig voneinander nach den wahrscheinlichen Ursachen für den verjüngenden Effekt des Bluts zu suchen. Irina und Michael Conboy arbeiteten inzwischen an der University of California in Berkeley. Im Jahr 2008 brachten sie das Phänomen der Muskelverjüngung mit zwei möglichen Faktoren in Zusammenhang: der Aktivierung des so genannten Notch-Signalwegs, der die Zellteilung fördert, und der Inaktivierung des »transforming growth factor« TGF- β , der die Zellteilung blockiert. Dann beschrieben sie 2014, wie das im Blut zirkulierende Hormon Oxytozin Alterungsprozesse aufhalten kann. Bisher war es vor allem für seine Rolle beim Geburtsprozess und bei zwischenmenschlichen Bindungen bekannt. Der Oxytozinspiegel sinkt bei Männern und Frauen mit dem Alter. Wird das Hormon alten Mäusen ins Blut gespritzt, werden innerhalb weniger Wochen Muskelstammzellen aktiv und regenerieren die Muskeln.

Wagers führte ab 2004 mit einer eigenen Arbeitsgruppe die Anti-Aging-Forschung in Harvard fort. Sie holte sich die Expertise einiger Spezialisten ein, mit deren Hilfe sie untersuchte, wie junges Blut die verschiedenen Organsysteme beeinflusst. Mit dem Neurowissenschaftler Robin Franklin von der englischen University of Cambridge konnte ihr Team zeigen, wie die Reparatur von verletztem Rückenmark in älteren Mäusen gefördert wird; zusammen mit dem Hirnforscher Lee Rubin von der Harvard University beobachtete sie eine beschleunigte Neuronenbildung; und mit dem Kardiologen Richard Lee vom Brigham and Women's Hospital in Boston stellte sie fest, dass jugendliches Blut auch die altersabhängige Herzwandverdickung rückgängig macht.

Bereits Blutbestandteile wirken

Auf der Suche nach Proteinen, die im jüngeren Blut verstärkt auftreten, richteten Lee und Wagers ihre Aufmerksamkeit auf den Wachstumsfaktor GDF11. Es reichte schon aus, Mäusen allein dieses Eiweißmolekül zu injizieren, um Kraft und Ausdauer der Muskulatur zu verbessern und Erbgutschäden in den Muskelstammzellen zu beheben. Diese Erkenntnis aus den Jahren 2013 und 2014 hat zwar noch kein anderes Labor im Mausmodell untermauert, aber Fruchtfliegen be-



sitzen ein ähnliches Protein, das bei ihnen lebensverlängernd und muskulaturschützend wirkt.

Der Stanford-Forscher Tony Wyss-Coray führte Randos unveröffentlichte Arbeiten weiter und konnte bestätigen, dass junges Blut bei alten Mäusen tatsächlich das Neuronenwachstum anregt. Umgekehrt verzögert das Blut alter Mäuse das Wachstum bei jungen. Die Blutzellen werden dabei nicht benötigt. »Wir mussten nicht einmal das gesamte Blut austauschen, denn schon das Plasma allein bewirkte die Veränderungen«, erklärt Wyss-Coray. Als sein Team die Auswirkungen im Gehirn der Tiere untersuchte, bemerkten sie gesteigerte neuronale Plastizität und bessere Gedächtnisbildung bei den Mäusesenioren – diese lernten und erinnerten sich besser. »Wir konnten nicht glauben, dass es wirklich funktioniert.«

Das konnten die Reviewer des eingereichten Manuskripts auch nicht. Als Wyss-Coray das Paper mit seinen Erkenntnissen veröffentlichen wollte, wurde es sofort abgelehnt mit der Begründung, die Ergebnisse seien zu gut, um wahr zu sein. Das Team verbrachte dann ein Jahr damit, die Experimente an der University of California zu reproduzieren. Und auch

in diesem anderen Labor mit anderen Mitarbeitern und Geräten kamen sie zu gleichen Resultaten. »Das beruhigte mich wirklich, und ich bin von der Methode absolut überzeugt«, begründigt Wyss-Coray.

Seine Publikation im Mai 2014 zog die Aufmerksamkeit einer Firma in Hongkong auf sich. Deren Eigentümer blicken selbst auf eine Familiengeschichte mit der Alzheimerkrankheit zurück, bei der die Neurone im Gehirn allmählich ihre Funktion verlieren. Einem der Angehörigen ging es nach wiederholten Plasmatransfusionen tatsächlich zeitweise besser, so dass die Firma bereit war, die Anfangsfinanzierung für eine klinische Studie zur Verfügung zu stellen. Wyss-Corays eigens für diese Forschung gegründete Firma Alkahest begann damit im September 2014. Das Ziel ist, Sicherheit und Wirksamkeit bei Transfusionen von Plasma junger Spender bei Alzheimererkrankten zu überprüfen. Die Patienten im Alter von mehr als 50 Jahren haben bereits die ersten Plasma-proben von Männern unter 30 erhalten. Die Wissenschaftler überwachen die Krankheitssymptome, suchen mit Hirnscans nach organischen Veränderungen und prüfen Biomarker der Erkrankung im Blut.

Unklarheiten dämpfen die Euphorie

Auch Amy Wagers ist gespannt auf die Ergebnisse. Sie fürchtet aber, das ganze Feld würde im Fall eines Misserfolgs zurückgeworfen, denn die Ursachen dafür wären nur schwer aufzudecken. Unklar ist beispielsweise, ob das Plasma eines 30-jährigen Spenders überhaupt noch Faktoren enthält, die einem Alzheimerpatienten nützen. Sie, Rando und andere wollen lieber erst einmal gezielt einzelne Blutbestandteile testen und kombinieren, deren Wirkmechanismus bereits bekannt ist.

Nach wie vor ist auch nicht auszuschließen, dass die Aktivierung von Stammzellen – offenbar in den meisten Fällen der Haupteffekt des jungen Bluts – langfristig die Zellen zu stark dazu anregt, sich zu teilen. »Möglichlicherweise fördert die dauerhafte Behandlung mit verjüngenden Substanzen wie Plasma oder Medikamenten auch die Entstehung von Krebs«, gibt Rando zu bedenken. »Selbst wenn wir irgendwann in der Lage sind, Zellen aktiv jünger zu machen, müssen wir das mit Bedacht tun.«

Michael Conboy sorgt sich noch aus anderen Gründen: Weil doch etliche Mäuse vorzeitig an der Parabiose-Krankheit sterben, mahnt er zur Vorsicht dabei, die Methode beim Menschen einzusetzen und regelmäßig größere Mengen Blut oder Plasma zu übertragen. Der Geschäftsführer von Alkahest, Karoly Nikolic, hat Verständnis für seine Bedenken, wendet aber ein, dass in anderen Zusammenhängen bereits Millionen von Blut- und Plasmatransfusionen komplikationslos durchgeführt wurden.

Die erste Alkahest-Studie soll Ende 2015 abgeschlossen werden. Das Unternehmen plant schon weitere und will untersuchen, ob Plasma junger Spender sich eignet, um verschiedene Arten von Demenz und andere Alterserkrankungen zu behandeln.

Skepsis ist gerechtfertigt, betrachtet man all die enttäuschten Hoffnungen beim Anti-Aging. In den letzten Jahrzehnten gab es unzählige Ansätze: kalorienreduzierte Ernährung; Substanzen wie das aus der Schale von Weintrauben isolierte Resveratrol; das Enzym Telomerase, welches für intakte Endstücke der Chromosomen bei der Zellteilung sorgt; das bei Mäusen lebensverlängernde Immunsuppressivum Rapamycin und nicht zuletzt Stammzellen, deren Zahl und Funktionsfähigkeit mit dem Alter abnimmt.

Lediglich zwei davon, die kalorienreduzierte Ernährung und Rapamycin, verlangsamten bei Experimenten nachweislich die Alterung verschiedener Gewebetypen oder drehten sie sogar zurück. Doch hat Rapamycin starke Nebenwirkungen, und weder die lebensverlängernden Mechanismen der Kalorienrestriktion noch ihre tatsächliche Wirksamkeit bei Primaten sind geklärt.

Junges Blut dagegen scheint nun Alterungseffekte umzukehren, möglicherweise mit nur wenigen Risiken in der Anwendung beim Menschen und zumindest bisher mit vielen untermauernden Ergebnissen aus Parabioseexperimenten verschiedener Labore. Aber Wissenschaftler und Ethiker haben Bedenken bei Behandlungsversuchen außerhalb von klinischen Studien, solange die Sicherheit und Wirksamkeit nicht eindeutig gezeigt sind. Schließlich boomt die Industrie mit nicht lizenzierten Stammzelltransplantationen, warnt Mark Mattson, und ungenehmigte Transfusionen wären sogar noch einfacher umzusetzen. »Oft entstehen lukrative Märkte, die sich nur auf einzelne Ergebnisse stützen«, kommentiert dies Leigh Turner, der sich als Bioethiker an der University of Minnesota in Minneapolis mit dem Anti-Aging-Feld beschäftigt hat.

Bis jetzt ist die Behauptung, jugendliches Blut oder Plasma sei lebensverlängernd, schlichtweg unseriös. Es gibt einfach keine soliden Daten dazu. Und experimentelle Untersuchungen hierzu würden viele Jahre dauern – man müsste warten, bis die Mäuse auf natürlichem Weg gestorben sind, bis man die Daten analysieren könnte. »Wenn wir dafür eine Finanzierung hätten, dann würde ich das tun. Aber wir haben keine«, sagt Michael Conboy. Und fügt hinzu: »Hoffentlich bekommt sie überhaupt jemand irgendwo.«

DIE AUTORIN



Megan Scudellari arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Boston, USA.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1343324

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 517, S. 426–429, 22. Januar 2015

Designermoleküle für intelligente Medikamente

Maßgeschneiderte Polymere, die als Reaktion auf äußere Reize ihre Eigenschaften ändern, eröffnen der Medizin ganz neue Möglichkeiten. Zum Beispiel können sie dafür sorgen, dass lebensrettende Wirkstoffe sicher an ihren Zielort im Körper gelangen und dort genau dosiert über längere Zeit freigesetzt werden.

Von Darlene K. Taylor und Uddhav Balami

Wenn wir ein Rezept in der Apotheke einlösen oder ein Medikament über das Internet bestellen, denken wir kaum darüber nach, wie der Wirkstoff nach der Einnahme an die richtige Stelle im Körper gelangt. Dennoch ist genau dies ein entscheidender Punkt, der Materialforscher vor große Probleme stellt.

Die Schwierigkeiten beginnen, sobald das Arzneimittel in den Verdauungstrakt oder in den Blutstrom gelangt. Der Körper wehrt sich nämlich gegen das Eindringen von Fremd-

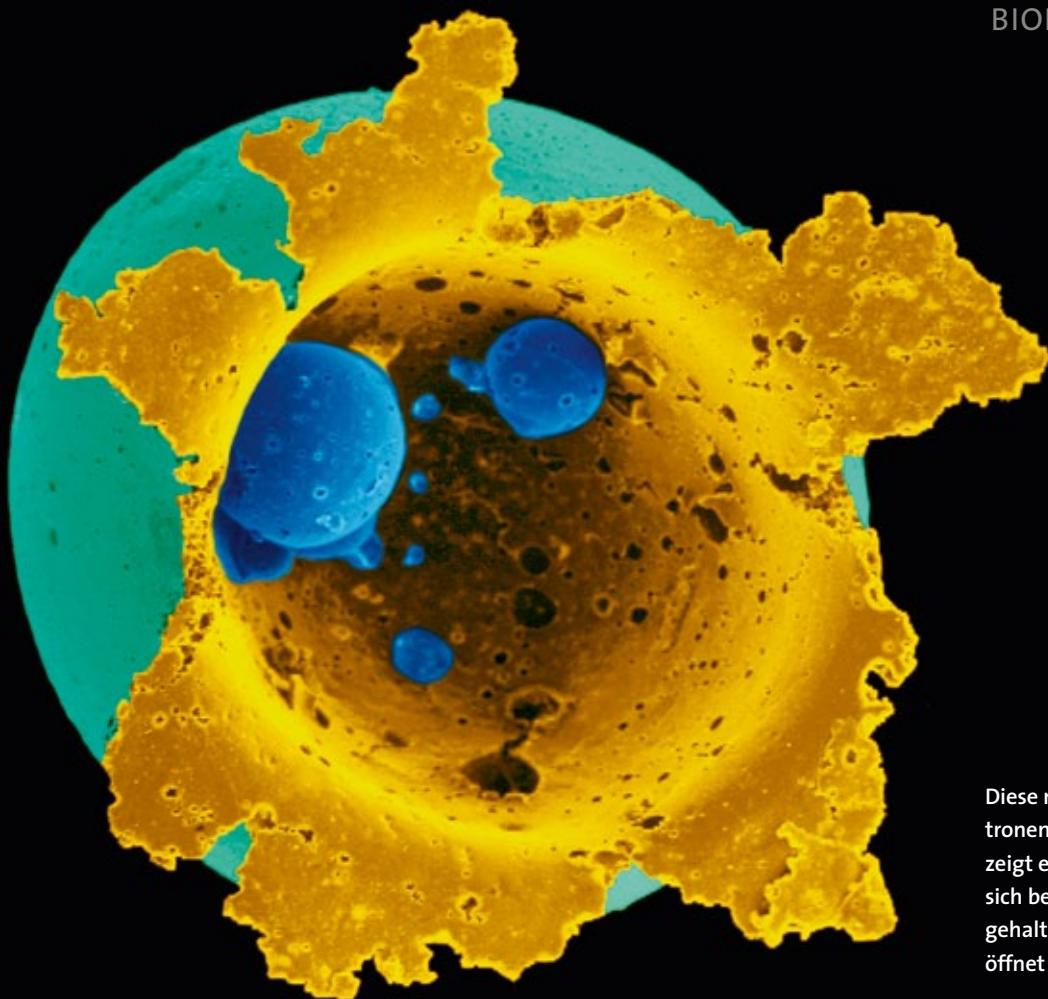
körpern oder externen Substanzen, selbst wenn es sich um ein lebensrettendes Medikament handelt. Von außen zugeführte unbekannte Stoffe auf molekularer Ebene zu zerstören, ist die Aufgabe von Antikörpern, die das Immunsystem in den Blutstrom abgibt. Andere Abwehrkomponenten wirken als physikalische Barrieren – etwa die Blut-Hirn-Schranke, eine weit gehend undurchlässige Auskleidung der Kapillargefäße des zentralen Nervensystems, die das Hirngewebe gegen das zirkulierende Blut abschottet. Auch wenn ein Wirkstoff diese Hürden überwindet, kann er dennoch sein Ziel verfehlen, weil er sich zum Beispiel nicht genügend im kranken Gewebe anreichert oder wieder aus dem Körper ausgeschieden wird, bevor er seine Wirkung entfalten kann.

Manche pharmazeutischen Substanzen gelangen problemlos an ihren Bestimmungsort, doch viele haben einen wahren Hindernislauf zu absolvieren. In diese Kategorie gehören leider auch Medikamente zur Behandlung tödlicher Krankheiten wie Krebs. Für effektivere Arzneimittel benötigt die pharmakologische Forschung also nicht nur geeignete Wirkstoffe, sondern auch molekulare Fähren, die deren Transport zum Krankheitsherz übernehmen. Das verlangt nach Materialien, die ihre physikalischen Eigenschaften dem jeweiligen Milieu anpassen.

AUF EINEN BLICK

FLEXIBLE TRANSPORTER

- 1 Idealerweise sollte ein **medizinischer Wirkstoff** direkt zum **Krankheitsherz** befördert werden und dort über längere Zeit in gleich bleibender Menge zur Verfügung stehen.
- 2 Neu entwickelte **Kunststoffe**, die beim Belichten oder Erwärmen auf Körpertemperatur ihre Erscheinungsform ändern, bieten die Chance, dieses Ideal zu verwirklichen.
- 3 Das gilt auch für **Liposomen**, deren Lipiddhülle einen molekularen Reißverschluss enthält, der sich beim Erwärmen öffnet.



Diese nachkolorierte rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt eine Kunststoffkapsel, die sich bei Änderung des Säuregehalts im umgebenden Milieu öffnet und ihren Inhalt freigibt.

AG.FOCUS / SCIENCE PHOTO LIBRARY / DAVID MCCARTHY

Bedeutende Fortschritte im Bereich des Moleküldesigns erlauben Forschern heute die gezielte Konstruktion von Stoffen, die in definierter Weise auf Reize aus der Umgebung ansprechen, seien es Temperatur, Säuregrad, Druck, mechanische Krafteinwirkung, ein elektrisches Potenzial, ein Lösungsmittel, chemische Substanzen, Magnetfelder, gewisse Ionenkonzentrationen oder Licht bestimmter Wellenlängen. Die Reaktion kann beispielsweise darin bestehen, dass die Materialien ihre Erscheinungsform oder Oberflächenbeschaffenheit ändern, verklumpen, komplexere Strukturen bilden oder in einen anderen physikalischen Zustand übergehen. Während sich die eine Substanz etwa beim Erwärmen in eine gallertartige Masse verwandelt und bei sinkenden Temperaturen wieder flüssig wird, enthält eine andere vielleicht Moleküle, in denen bei Lichteinfall chemische Bindungen aufbrechen und sich später wieder schließen. Solche »intelligenten« Materialien sind vielfältig einsetzbar: nicht nur zum gezielten Transport von Wirkstoffen, sondern auch zum Züchten von Geweben, zum Aufreinigen biologischer Produkte sowie für optische Systeme, Sensoren und Beschichtungen.

Generell gehören alle diese Materialien zur Substanzklasse der Polymere. Dabei handelt es sich um Stoffe, die aus einem perlenkettenartigen Verbund sehr vieler identischer

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

DIE MEDIZIN DER ZUKUNFT

- | | | |
|--------|--|----------------|
| Teil 1 | ► Die RNA-Revolution
<i>Christine Gorman und Dina Fine Maron</i> | Mai 2015 |
| | Nanomedizin
<i>Dina Fine Maron, Mark Peplow und Larry Greenemeier</i> | |
| Teil 2 | ► Designermoleküle für intelligente Medikamente
<i>Darlene K. Taylor, Uddhav Balami</i> | Juni 2015 |
| Teil 3 | ► Neue Tricks
knacken Antibiotikaresistenzen
<i>Carl Zimmer</i> | Juli 2015 |
| Teil 4 | ► Zuckerimpfstoffe
<i>Peter Seeberger</i> | August 2015 |
| Teil 5 | ► Gezielte Gentherapie mit molekularen Scheren
<i>Margaret Knox</i> | September 2015 |
| Teil 6 | ► Menschliche Organe aus Tieren
<i>Jens Clausen</i> | Oktober 2015 |

kleiner Molekülbausteine bestehen: den so genannten Monomeren. In der Natur kommen sie in zahlreichen Varianten vor, etwa als Kautschuk, Insektenpanzer oder Spinnenfäden. Die Monomere sind über stabile chemische Bindungen miteinander verknüpft. Dies verleiht dem Material Festigkeit und Flexibilität. Da die verschiedensten Moleküle als Kettenglieder dienen können, ergibt sich eine enorme Vielfalt an Strukturen. Polymere sind schon seit Langem eine wichtige Substanzklasse und spielen als Kunststoffe in unserem Alltag eine bedeutende Rolle. Doch erst die Methoden des molekularen Designs ermöglichen die Herstellung intelligenter Materialien, die in gewünschter Weise auf veränderte Umweltbedingungen reagieren.

Wir selbst entwickeln so genannte thermoresponsive Polymere, die auf Wärme ansprechen. Sie bestehen aus Monomeren, deren Eigenschaften sich ändern, wenn die Temperatur der Lösung einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Dann verwandeln sie sich von hydrophilen in hydrophobe Substanzen, schalten also von gut wasserlöslich auf Wasser abweisend um. Dabei ändern sie ihre Gestalt derart, dass ein geringerer Anteil ihrer Oberfläche mit dem umgebenden

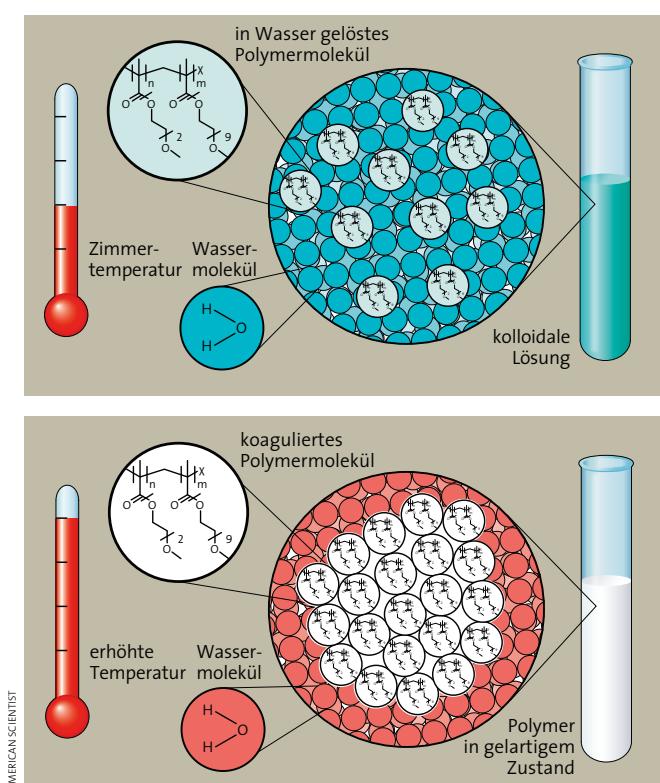
Wasser in Kontakt kommt. Diese Veränderung stört das Netzwerk von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen ihnen und den Molekülen des Lösungsmittels. Das gebundene Wasser wird rasch verdrängt, und die Polymere verknäulen sich zu kompakten Kugelchen, die aus der Lösung ausfallen. Sinkt die Temperatur wieder unter den kritischen Wert, schalten sie jedoch zurück zum hydrophilen Verhalten und nehmen größere Mengen Wasser auf – das Material geht vom festen in den gelösten Zustand über.

Behandlung von Geschwüren in der Gebärmutter

Eine solche temperaturabhängige Verhaltensänderung macht thermoresponsive Polymere zu interessanten Komponenten von intelligenten Transportsystemen für Arzneistoffe. Mediziner, Biotechnologen und Pharmakologen haben dieses Potenzial rasch erkannt und nutzen es zunehmend. Teils werden Polymere sogar eigens als Wirkstoffträger entwickelt. ReGel, ein breit eingesetztes Carriersystem der US-Firma Allergan, ist Bestandteil von zwei Medikamenten: OncoGel, mit dem Wirkstoff Paclitaxel zur Behandlung des Ösophaguskarzinoms, und Cytoryn, mit dem Zytokin Interleukin-2 (IL-2) zur Immuntherapie von Krebskrankungen. Außerdem dient es in dem Präparat Timoptic-XE (Merck & Co.) zur kontrollierten Freisetzung des Wirkstoffs Timolol gegen erhöhten Augeninnendruck.

Unser Labor an der North Carolina Central University war führend bei der Entwicklung von LiquoGel, einem anderen synthetischen thermoresponsiven Polymer zur gezielten Freisetzung medikamentöser Wirkstoffe. (Wir haben ein Patent beantragt, nutzen das System jedoch noch nicht kommerziell.) Bei Raumtemperatur bildet LiquoGel eine wirkstoffhaltige wässrige Lösung, die mittels Spritze oder Kanüle an einer geeigneten Körperstelle injiziert werden kann. Im Gewebe erwärmt sich die Lösung auf Körpertemperatur und wandelt sich dadurch in ein Gel um. Dieses hält die gelöste Wirksubstanz am Injektionsort fest, so dass sie erst beim allmählichen Abbau des Materials ins umgebende Gewebe gelangt, was eine kontinuierliche Freisetzung in kleinen Dosen über einen längeren Zeitraum gewährleistet.

Da LiquoGel seine Materialeigenschaften schon bei mäßigem Erwärmen verändert, eignet es sich für vielerlei medizinische Zwecke. In einer der bisher am besten untersuchten Anwendungen prüfen unsere Kooperationspartner an der Duke University in Durham (North Carolina), ob es sich zur lokalen Behandlung von Uterusmyomen einsetzen lässt. Solche Geschwüre, die aus Muskel- und Bindegewebe bestehen, finden sich bei 70 bis 80 Prozent der Frauen im Alter von 50 Jahren in der Wand der Gebärmutter. Obwohl sie nicht bösartig sind, führen sie teils zur erheblichen gesundheitlichen Beeinträchtigungen; so verursachen sie oft Schmerzen, verstärkte Monatsblutungen oder auch Schwangerschaftskomplikationen. Uterusmyome sind in den USA (in Deutschland ebenso) der häufigste Grund für das operative Entfernen der Gebärmutter (Hysterektomie) und belasten das Gesundheitssystem mit rund zwei Milliarden US-Dollar pro



Ein thermorespones, also auf Temperaturänderung reagierendes Polymer kann dazu dienen, einen Wirkstoff dosiert an einer bestimmten Stelle im Körper freizusetzen. Bei Raumtemperatur ist es wasserlöslich (oben). Sobald es sich nach der Injektion ins Gewebe des Zielbereichs auf Körpertemperatur erwärmt, fällt es jedoch aus und geht in einen gelartigen Zustand über (unten). Dabei schließt es den Wirkstoff ein und hält ihn fest. Es gibt ihn dann kontinuierlich in kleinen Mengen ab, während es langsam abgebaut wird.

Moleküle mit Licht steuern

Außer thermoresponsiven Materialien gibt es einen weiteren hochinteressanten Typ von intelligenten Polymeren: Sie ändern ihre Eigenschaften, wenn Licht bestimmter Wellenlängen auf sie fällt. Licht ist ein »sauberer« Reiz, der eine berührungsreie Steuerung ermöglicht. Fotoresponsive Materialien eignen sich daher für vielerlei Zwecke – beispielsweise in optischen oder mikroelektrochemischen Systemen, Sensoren, Textilien, Beschichtungen und Solarzellen.

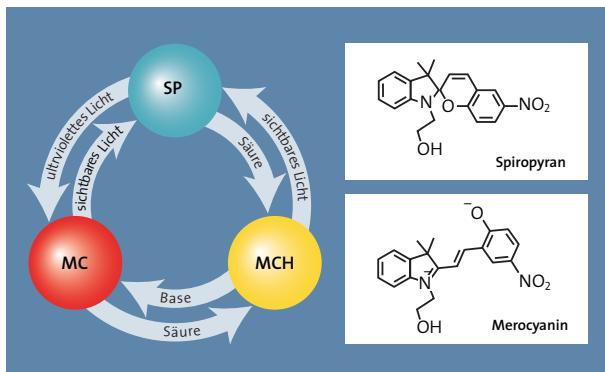
Besondere Aufmerksamkeit schenken die Forscher derzeit Materialien, die lichtabhängig ihre Farbe verändern. In unserem Labor untersuchen wir eine Familie von Polymeren, die ein so genanntes Spiropyran enthalten. Wenn es mit ultraviolettem Licht bestrahlt wird oder wenn sich der Säuregrad der Umgebung ändert, öffnet sich ein Ring in diesem Molekül. Dadurch entsteht eine chromophore Gruppe (eine farberzeugende Molekülregion), die sichtbares Licht stark absorbiert. Als Folge davon schließt sich der Ring wieder.

Wie andere im Artikel besprochene Materialien eignet sich dieses intelligente Polymer für biomedizinische Anwendungen – etwa zur kontrollierten Freisetzung verkapselfter Wirkstoffe. Es lässt sich aber auch für ganz andere Zwecke heranziehen, zum Beispiel in der Textilindustrie. Hier könnte man fotoresponsive Polymere in Stoffe einweben, so dass diese ihre Farbe ändern oder ein aufgedrucktes Muster sichtbar machen, wenn sie dem Tageslicht ausgesetzt werden. Fasern, deren Farbwechsel eine übermäßige Sonnenexposition anzeigen, wären womöglich für Kinderkleidung sinnvoll.

Polymere sind zwar üblicherweise Isolatoren. Doch manche leiten Strom, wenn sie elektromagnetische Strahlung absorbieren. Dabei wird ein Elektron auf ein höheres Energieniveau gehoben, wo es frei beweglich ist. Da es beim Rückfall auf eine niedrigere Stufe ein Photon aussendet, sind solche Stoffe meist fluoreszierend.

Derartige Polymere können auch zum Einfangen von Sonnenlicht für Photovoltaiksysteme dienen. Zwar lässt sich damit bisher nicht so effizient Strom erzeugen wie mit herkömmlichen Halbleitern. Dennoch gelten sie als das Material der Zukunft in der Photovoltaik, da sie kostengünstig herzustellen sind. Forscher arbeiten daran, ihren Wirkungsgrad zu verbessern. Im Idealfall könnten Solarzellen auf Polymerbasis ein breites Spektrum von Wellenlängen vom ultravioletten bis zum infraroten Bereich erfassen und so zum Beispiel elektronische Geräte netzunabhängig mit kostenlosem Strom versorgen.

Unser Team interessiert sich in diesem Zusammenhang schon seit Längerem für Materialien aus kurzkettigen Polymeren von para-Phenylen. Wie wir in experimentellen und theoretischen Untersuchungen herausgefunden haben, verschiebt sich das Absorptionspektrum dieser fotoresponsiven Substanzen zu längeren Wellenlängen hin – also stärker in den roten



Fotoresponsive Polymere, die das Moleköl Spiropyran (SP) enthalten, können lichtabhängig ihre Farbe ändern. Ultraviolette Strahlung bewirkt, dass sich Spiropyran zu Merocyanin (MC) umlagert, das die gleichen Atome in anderer Anordnung enthält. Dadurch absorbiert es nun sichtbares Licht, erscheint also farbig. Diese Absorption verwandelt Merocyanin zurück in Spiropyran. Spiropyanhaltige Polymere reagieren auch auf chemische Reize: In saurem Milieu entsteht aus Merocyanin die protonierte Variante MCH, die sich beim Auftreffen von sichtbarem Licht in Spiropyran umlagert.

Spektralbereich –, wenn wir an die Moleküle bestimmte chemische Gruppen hängen. Vermutlich lässt sich ihr Absorptionspektrum durch Anfügen eines starken Elektronenakzeptors wie NO₂ noch mehr verbreitern.

Besonders gut als Antennen zum Einfangen von Licht und zum Weiterleiten der dabei angeregten Elektronen – und damit zum Übertragen der aufgenommenen Energie – eignen sich Polymere, die Übergangsmetalle wie Ruthenium enthalten. Zusammen mit Kollegen an der University of North Carolina in Chapel Hill haben wir viel versprechende Hybridsysteme aus Ruthenium und Polymeren entwickelt, etwa ein Ruthenium-(II)-Polypyridylderivat von Polystyrol. Die Untersuchungen an ihnen dürften dazu beitragen, den Transport von Elektronen und Energie in fotoresponsiven Polymeren besser zu verstehen. Neueste Studien legen zum Beispiel nahe, dass die räumliche Verteilung der Rutheniumionen im Kunststoff eine entscheidende Rolle spielt.

Polymer-Solarzellen hätten gegenüber den heute weit verbreiteten konventionellen Systemen auf Siliziumbasis einige Vorteile. Polymere lassen sich einfach und preiswert in großen Mengen produzieren; zudem haben sie ein geringes Gewicht und sind biegsam. Deshalb könnten sie nicht nur in der Photovoltaik, sondern auch in der Textilindustrie Verwendung finden: Man würde sie einfach in Stoffe einweben. Dann wäre es zum Beispiel denkbar, elektronische Geräte per Kontakt mit fotoresponsiven Textilien aufzuladen.

Jahr (in Deutschland knapp eine halbe Milliarde Euro). Leider sind die derzeit bestehenden Therapiemöglichkeiten insgesamt unbefriedigend.

Per Operation, Verödung von zuführenden Arterien oder MRT-gesteuerter Ultraschallbehandlung lassen sich Myome zwar beseitigen, ohne dass gleich die gesamte Gebärmutter entfernt werden muss. Doch alle diese Prozeduren sind aufwändig und teuer. Zudem bilden sich die Geschwülste bei viele Patientinnen zurück. Auch Medikamente gegen Myome helfen oft nicht auf Dauer und haben erhebliche Nebenwirkungen. Zudem erbrachten klinische Studien zu manchen Arzneimitteln enttäuschende Resultate.

Es gibt zwar eine wirklich erfolgversprechende Wirkstoffgruppe: selektive Progesteron-Rezeptormodulatoren. Sie verkleinern die Myome und lindern die Symptome. Wegen unerwünschter Effekte auf die Gebärmutterhaut sind diese Substanzen jedoch von der Arzneimittelbehörde FDA in den USA bisher nicht als Medikament zugelassen worden. In Deutschland dagegen darf der Progesteron-Rezeptormodulator Ulipristal unter bestimmten Bedingungen eingesetzt werden.

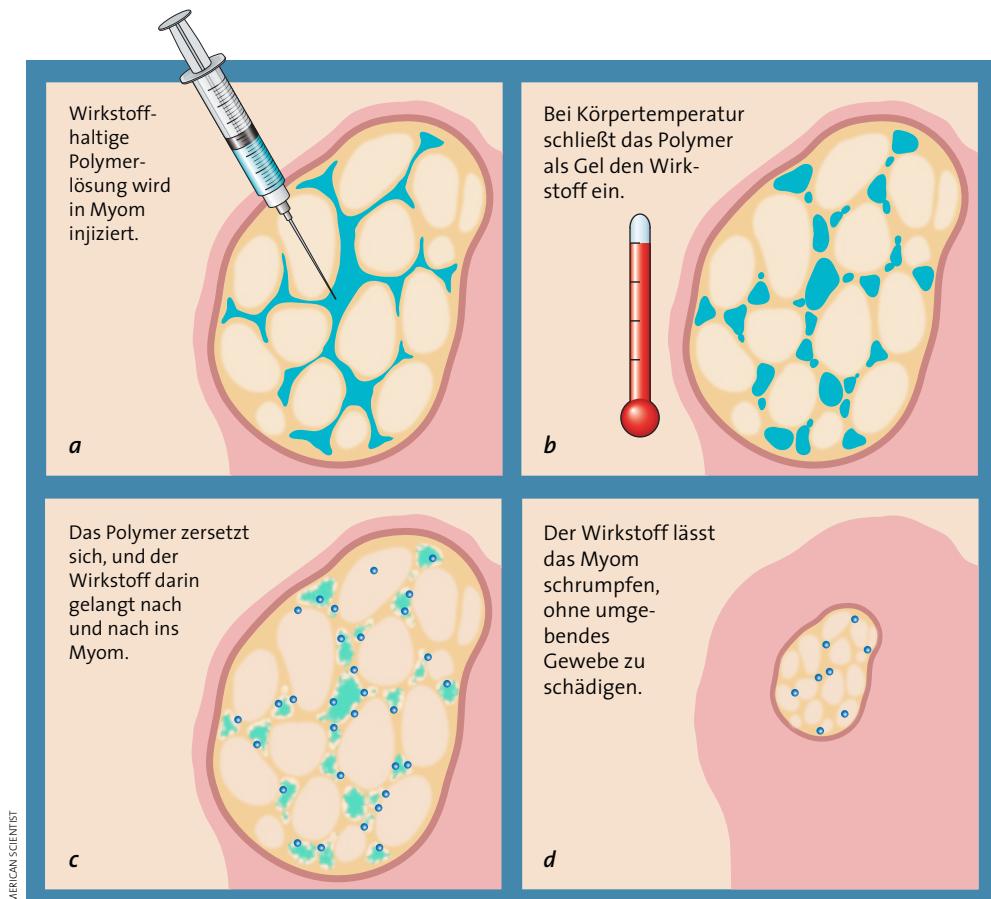
Polymergebundene Medikamente direkt in die Myome zu injizieren, wäre ein neuer Therapieansatz, durch den sich die Nebenwirkungen möglicherweise deutlich reduzieren ließen. In diesem Fall kämen auch kleine Peptide als Wirkstoffe in Frage, die sich nicht für die Einnahme als Tablette eignen, weil sie im Magen-Darm-Trakt verdaut werden, bevor sie

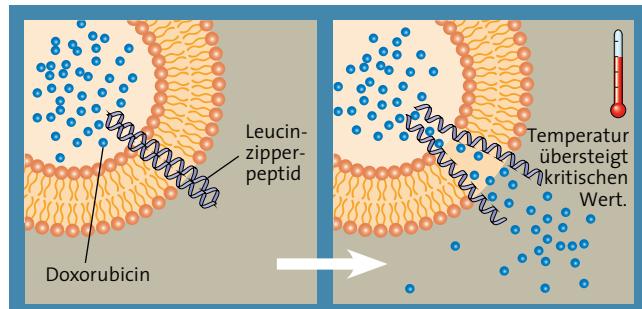
ihren Zielort erreichen. Außerdem könnten niedergelassene Gynäkologen die Injektionen in Myome selbst in ihren Praxen vornehmen, was den Therapieaufwand für eine fruchtbarkeiterhaltende Therapie deutlich senken würde. Dabei sollten wenige Injektionen genügen, da der polymere Wirkstoffträger die Freisetzung sowie die Verteilung und den Abbau des Medikaments verzögert.

Liposomen mit Öffnungsmechanismus

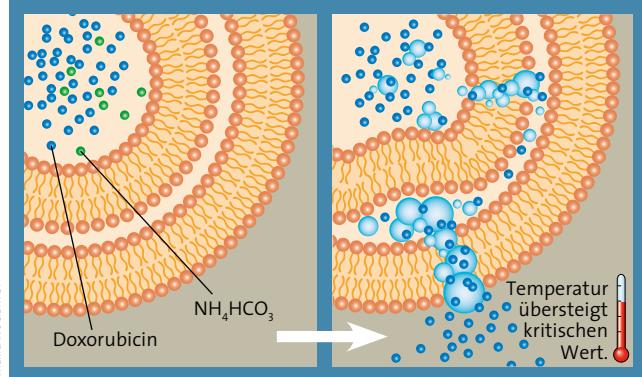
Ein weiteres thermoresponsives Trägersystem, das andere Forscher entwickelt haben, beruht auf synthetischen Lipidbläschen, so genannten Liposomen. Sie entsprechen in ihrem Aufbau jener doppelschichtigen Membran aus Phospholipiden, die alle lebenden Zellen umgibt. Ihre Hülle geht beim Erwärmen jedoch in einen gelartigen Zustand über und baut sich dann langsam ab, wobei der Wirkstoff allmählich frei wird.

Thermosensitive Liposomen (TSLs) befinden sich derzeit bei Patienten mit verschiedenen Erkrankungen in der klinischen Erprobung. Die Lipidbläschen in dem Präparat ThermoDox der Firma Celsion Corporation enthalten das Krebsmedikament Doxorubicin und setzen es bei lokaler Überwärmung auf die Grenztemperatur von 40 Grad Celsius gezielt im Bereich des Tumors frei. Das Arzneimittel wird aktuell in Studien der Phase II bei Brustkrebs und bei Darmkrebs mit Lebermetastasen geprüft. Beim primären Leberzellkarzinom läuft bereits eine Studie der Phase III.





Intelligente Liposomen können ihren Inhalt, etwa das Krebsmedikament Doxorubicin, über verschiedene Mechanismen freisetzen. Ist ihre Lipidhülle mit einem »Reißverschluss« (englisch: zipper) aus leucinhaltigen Peptiden verschlossen (oben links), dann öffnet dieser sich beim Erwärmen (oben rechts). Alternativ kann man dem Liposom auch Ammoniumhydrogencarbonat zufügen (unten links), das sich oberhalb einer bestimmten Temperatur zersetzt. Dabei entsteht gasförmiges Kohlendioxid, das die Membranen durchdringt und den Wirkstoff entweichen lässt (unten rechts).



AMERICAN SCIENTIST

Einen weiteren interessanten Ansatz hat die Arbeitsgruppe um Z.S. Al-Ahmady am Centre for Drug Discovery des University College in London beschrieben. Die Forscher verwenden eine Mischkonstruktion aus Peptiden und Liposomen. In die Lipid-Doppelschicht sind dabei kurze spiralförmige Ketten aus der Aminosäure Leucin eingebettet. Das System nutzt die Faltung dieser Peptide für einen wärmeabhängigen Schalter. Bei Raumtemperatur bilden je zwei Leucinketten dichte reißverschlussartige Strukturen. Oberhalb der Grenztemperatur von 40 bis 45 Grad Celsius öffnen sich die Reißverschlüsse und entlassen den Wirkstoff aus dem Inneren des Liposoms in die Umgebung. Weil sich die auslösende Temperatur und die Konfigurationsänderung der Peptide fein justieren lassen, sind die Leucinpeptide sehr gut geeignet für die Entwicklung von intelligenten liposomalen Wirkstoffträgern.

Der wohl ungewöhnlichste Mechanismus zum Öffnen eines Liposoms bei einer kritischen Temperatur ist das Freisetzen von Kohlendioxidblasen in ihrem Inneren mit Hilfe von Ammoniumhydrogencarbonat (Hirschhornsalz), das bei etwa 42 Grad Celsius zerfällt. Das Gas erzeugt einen Überdruck, der die Anordnung der Moleküle in der Lipid-Doppelschicht verzerrt und die Hülle dabei durchlässig macht, so dass es entweichen kann. Gleichzeitig kommt der Wirkstoff frei. Gasgefüllte Liposomen eignen sich auch als Kontrastmittel bei der bildgebenden Darstellung von Geweben mittels Ultraschall.

Wie diese Beispiele deutlich machen, gewinnen intelligente Materialien nach Jahrzehnten der Forschung und Entwicklung zunehmend an Bedeutung in der Medizin, aber auch in der Biotechnologie. Die Kombination von Polymeren mit funktionstragenden chemischen Komponenten eröffnet

schier unbegrenzte Möglichkeiten. So werden intelligente Polymere schon in naher Zukunft

- zur Messung des pH-Werts in den Nieren dienen, um das Säure-Basen-Gleichgewicht zu überwachen,
- Blutgerinnsel anhand bestimmter Enzyme erkennen und sie auflösen,
- biochemische Wirkstoffe zur Reparatur fehlgefalteter Proteine bei der Alzheimer-, Parkinson- und Huntingtonkrankheit ins Gehirn transportieren,
- die Konzentration von Bestandteilen des Blutplasmas wie zum Beispiel Glukose regulieren helfen und
- chemische Signale blockieren, welche bösartige Wucherungen von Zellen auslösen.

Was einst nur eine theoretische Möglichkeit war, ist somit dabei, zum wichtigen Instrument für die Medizin der Zukunft zu werden. ≈

DIE AUTOREN



Darlene K. Taylor (Foto) ist Associate Professor am Chemischen Institut der North Carolina Central University in Durham und betreut **Uddhav Balami** als Doktoranden. Sie wurde vor Kurzem als Stipendiatin in das Programm Interdisciplinary Research Careers in Women's Health der National Institutes of Health der USA in Bethesda (Maryland) aufgenommen.

QUELLEN

- Al-Ahmady, Z. S. et al.:** Lipid-Peptide Vesicle Nanoscale Hybrids for Triggered Drug Release by Mild Hyperthermia in Vitro and in Vivo. In: American Chemical Society Nano 6, S. 9335–9346, 2012
- Chen, K.-J. et al.:** A Thermoresponsive Bubble-Generating Liposomal System for Triggering Localized Extracellular Drug Delivery. In: American Chemical Society Nano 7, S. 438–446, 2013
- Nirmal, H. B. et al.:** In-Situ Gel: New Trends in Controlled and Sustained Drug Delivery System. In: International Journal of Pharm-Tech Research 2, S. 1398–1408, 2010
- Roy, D. et al.:** Future Perspectives and Recent Advances in Stimuli-Responsive Materials. In: Progress in Polymer Science 35, S. 278–301, 2010
- Taylor, D. K., Leppert P. C.:** Treatment for Uterine Fibroids: Searching for Effective Drug Therapies. In: Drug Discovery Today: Therapeutic Strategies 9, e41–e49, 2012

Heißes Wasser in der Tiefe des Enceladus



Nanopartikel von Saturns Eismond Enceladus, aufgespürt mit dem Staubdetektor der Raumsonde Cassini, liefern das verblüffende Bild eines außerirdischen Ozeans, von dessen Grund heißes Salzwasser emporströmt. Herrschen auf dem Trabanten günstige Bedingungen für die Entstehung von Leben?

Von Frank Postberg und Thorsten Dambeck

Tief unter den Wellen des Atlantiks hat die Natur eigenartige Türme errichtet: Bis zu 60 Meter ragen sie über dem Meeresgrund auf und erinnern an die verlassenen Wolkenkratzer einer versunkenen Stadt. Nur Tauchroboter und U-Boote gelangen an diesen Ort 4500 Meter unter der Meeresoberfläche, wo der Lichtkegel ihrer Scheinwerfer das ewige Dunkel durchbricht und auf allerlei Getier fällt, das hier gedeiht.

In Massen besiedeln Schnecken, Krebse und Muscheln das hydrothermale Feld »Lost City« im Atlantis-Massiv, einem untermeerischen Gebirge des mittelatlantischen Rückens, das auf 30 Grad nördlicher Breite liegt. Die vermeintlichen Bauwerke bestehen aus Kalk und sind in Wahrheit hydrothermale Schleote, an denen heißes, mineralreiches Wasser aus dem Meeresboden austritt. Erst seit dem Jahr 2000 kennt man diesen exotischen Ort, den der I-Max-Film »Aliens of the Deep« in der Folge einem breiteren Publikum bekannt machte.

Mittlerweile sind auch Planetenforscher auf das bizarre Biotop aufmerksam geworden. Denn jüngste Ergebnisse

zeigen, dass »Lost City« in seinen physikalischen und chemischen Umweltbedingungen einer außerirdischen Welt ähnelt: dem Grund des Ozeans, den die Raumsonde Cassini in der Tiefe des Saturnmonds Enceladus entdeckt hat.

Unter den mehr als 60 bekannten Saturnmonden ist Enceladus ein eher kleines Exemplar, sein mittlerer Durchmesser beträgt nur 504 Kilometer. Entdeckt hat ihn 1789 der britisch-deutsche Astronom William Herschel. Auch in der Folgezeit blieb der Minimond lange Zeit ein Lichtpunktchen im Fernrohr; erst den Voyager-Sonden gelangen in den 1980er Jahren erste Porträts des Himmelskörpers. Er zeigt sich komplett eisbedeckt und stellt mit seiner hohen Rückstrahlfähigkeit, die sogar diejenige von Neuschnee übertrifft, alle anderen Oberflächen von Planeten und ihren Trabanten in den Schatten.

Auffällig ist auch die Bahn, die er um Saturn zieht. Denn Enceladus kreist inmitten von dessen E-Ring. Dieser diffuse Ring geringer Dichte weit jenseits der – bereits mit Amateurteleskopen sichtbaren – Hauptringe war den Astronomen lange



NASA / JPL /SSI / EMMY LINDWALLA; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

entgangen. Seine Entdeckung glückte erst 1966 mit Beobachtungen vom Erdboden aus. Im Zeitalter der Raumsonden fällt dem E-Ring bei der Erforschung des Enceladus nun aber eine Schlüsselrolle zu (siehe »E wie Enceladus«, S. 34).

Nach knapp sieben Jahren Flug hatte die amerikanisch-europäische Cassini-Huygens-Sonde Saturn im Sommer 2004 erreicht (siehe »Cassini – Ankunft am Saturn« in SdW 8/2004, S. 48). Sie ist die schwerste und teuerste Raumsonde, die je ins äußere Sonnensystem geschossen wurde, und gilt als außergewöhnlich erfolgreich. Ihre Mission wurde mehrfach verlängert; seit nunmehr einem Jahrzehnt zeichnen ihre Kameras und Instrumente das Bild des Planeten, seiner Ringe und Monde immer wieder neu. Insbesondere die Beobachtungen von Enceladus waren ein Paukenschlag, der die internationale Forschergemeinde aufhorchen ließ. Bereits 2005 waren Wissenschaftler in der Umgebung des Eismonds auf unerwartete Störungen von Saturs Magnetfeld gestoßen, die auf starke geologische Aktivität hindeuteten. Deren sichtbare Folge entdeckten sie dann einige Monate später: eine nur im Gegenlicht sichtbare, mächtige Eruptionsfahne, die sich von der Mondoberfläche aus hunderte Kilometer hoch ins Weltall erhebt. Sie stammt von einer Region um den Südpol, wo durch stark erwärmte Spalten im Eispanzer Fontänen aus Wasserdampf und Eispartikeln schießen.

Ort des Geschehens: Die »Tigerstreifen«

Schnell spekulierten manche Wissenschaftler, dass die Fontänen von flüssigem Wasser gespeist werden könnten. Das vermutete Gewässer sollte unter den »Tigerstreifen« liegen: einem System aus fast parallelen, bis zu 130 Kilometer langen und verästelten Gräben, die im Eis der Südpolregion klaffen.

Fontänen aus Eispartikeln schießen aus vier Grabensystemen am Südpol des Saturnmonds Enceladus hervor. Angetrieben werden sie von der Verdampfung flüssigen Wassers unter dessen Eiskruste. Das Foto gelang den Kameras des Saturnorbiters Cassini.

AUF EINEN BLICK

HABITABLE ZONE IN DER TIEFE

1 Der kleine Saturnmond **Enceladus** sprüht hohe **Fontänen aus Wasserdampf und Eiskristallen** ins Weltall und speist so den ausgedehnten E-Ring des Gasplaneten. Das Wasser stammt aus einem **salzigen Ozean**, der am Südpol des Monds tief unter dem Eis liegt.

2 **Nanopartikel aus Siliziumdioxid**, die der Staubdetektor der Cassini-Sonde jüngst vermessen hat, zeigen, dass am Grund des Meeres **Temperaturen von 90 bis vielleicht über 200 Grad Celsius** und alkalische pH-Werte herrschen.

3 Gebiete am Boden irdischer Ozeane, in denen vergleichbare Bedingungen herrschen, gelten vielen Forschern als **Ursprungsorte des Lebens**. Darum richten nun Astrobiologen ihr Interesse auf den sonnenfernen Mond.

Doch die These von flüssigem Wasser an diesem sonnenfernen Ort – im Saturnsystem herrschen im Mittel minus 200 Grad Celsius – geriet bald unter Beschuss. Schließlich ließen sich die Fontänen möglicherweise auch ohne Wasser in der Tiefe erklären, etwa durch Sublimation erwärmt Eises in den »Tigerstreifen« oder durch explosionsartige Freisetzung von Gasen, die vorher in Form von Klathraten, also eingesperrt in »Käfigen« von Eismolekülen, gebunden waren.

Inzwischen belegen jedoch mehrere Messungen Cassinis, dass Enceladus tatsächlich ein verborgenes Tiefenmeer beherbergt. Dem Radio Science Subsystem (RSS) an Bord der Sonde verdanken wir sogar detaillierte Informationen über den Aufbau des Trabanten. Bei drei Vorbeiflügen zwischen 2010 und 2012 verfolgten Wissenschaftler mit diesem Instrument die von der Cassini-Sonde ausgehenden Radiosignale. Abhängig vom Schwerefeld des Monds unterliegen sie entlang der Flugbahn geringfügigen Veränderungen, aus denen sich die Massenverteilung innerhalb des Himmelskörpers ermitteln lässt. Das Team um Luciano Iess von der Uni-

versität Rom stieß dabei auf eine Schwerkraftanomalie in der Südpolregion, die sich nur erklären lässt, wenn dort eine Zone höherer Dichte im eisigen Untergrund existiert – es muss sich um Wasser handeln, das etwa sieben Prozent dichter ist als Eis. Daraus folgerten die Wissenschaftler, dass sie das indirekte Signal eines Ozeans aufgefangen hatten. Ihre Resultate präsentierten sie 2014 im Fachjournal »Science«. Demzufolge liegt der Ozean 30 bis 40 Kilometer tief unter der Eiskruste und ist rund zehn Kilometer mächtig. Das Gewässer erstreckt sich vermutlich vom Südpol aus in alle Richtungen bis etwa zum 50. südlichen Breitengrad; auch einen globalen Tiefenozean schließen die Daten nicht ganz aus. Aber selbst wenn das ferne Meer auf die südliche Polregion begrenzt ist, fasst es mindestens die 250-fache Wassermenge des Bodensees.

Ein zentrales Argument für die Existenz des Ozeans hatten Messungen mit dem Cosmic Dust Analyzer, kurz CDA, bereits 2009 geliefert. Der maßgeblich am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg entwickelte Staubdetektor wird nun vom Institut für Raumfahrtssysteme der Universi-

E wie Enceladus

Der diffuse E-Ring ist der äußerste und daher in seinen Ausmaßen größte von Saturs System aus Ringen. Diese wurden in der Reihenfolge ihrer Entdeckung benannt und von innen nach außen als D-, C-, B-, A-, F-, G- und schließlich E-Ring bezeichnet. Letzterer ist in mehrfacher Hinsicht etwas Besonderes.

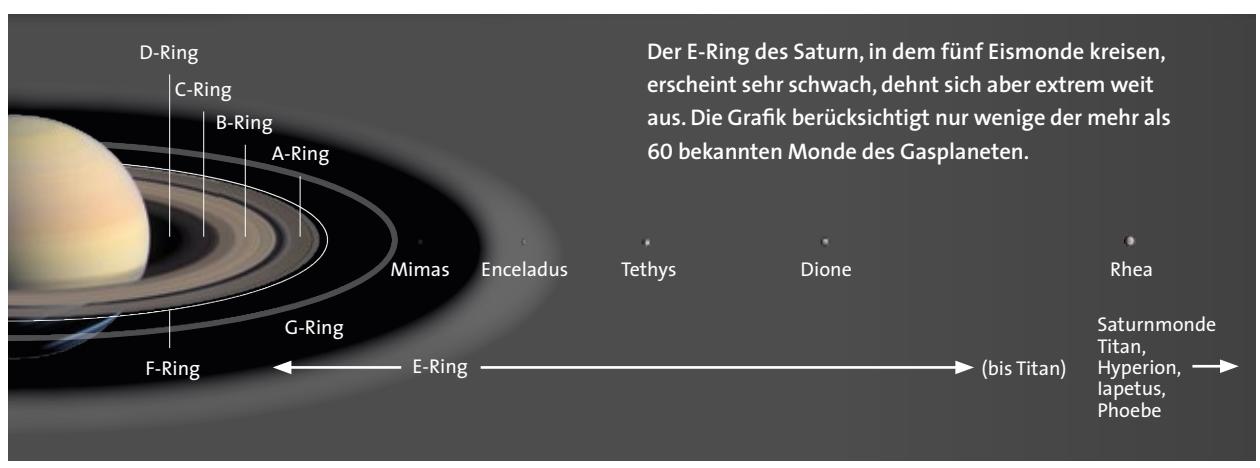
Entdeckt hat ihn 1966 der US-Astronom Walter Feibelman (1925–2004). In jenem Jahr waren die viel helleren, aber extrem flachen Hauptringe bei einer Kantenstellung fast unsichtbar, so dass der bläuliche E-Ring bei einer Langzeitbelichtung mit dem Teleskop hervortrat. Anders als die Hauptringe enthält er keine großen Staubteilchen; Raumsonden können ihn also gefahrlos durchfliegen. Sie müssen nur auf einige Eismonde darin achten, nämlich Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea und Titan.

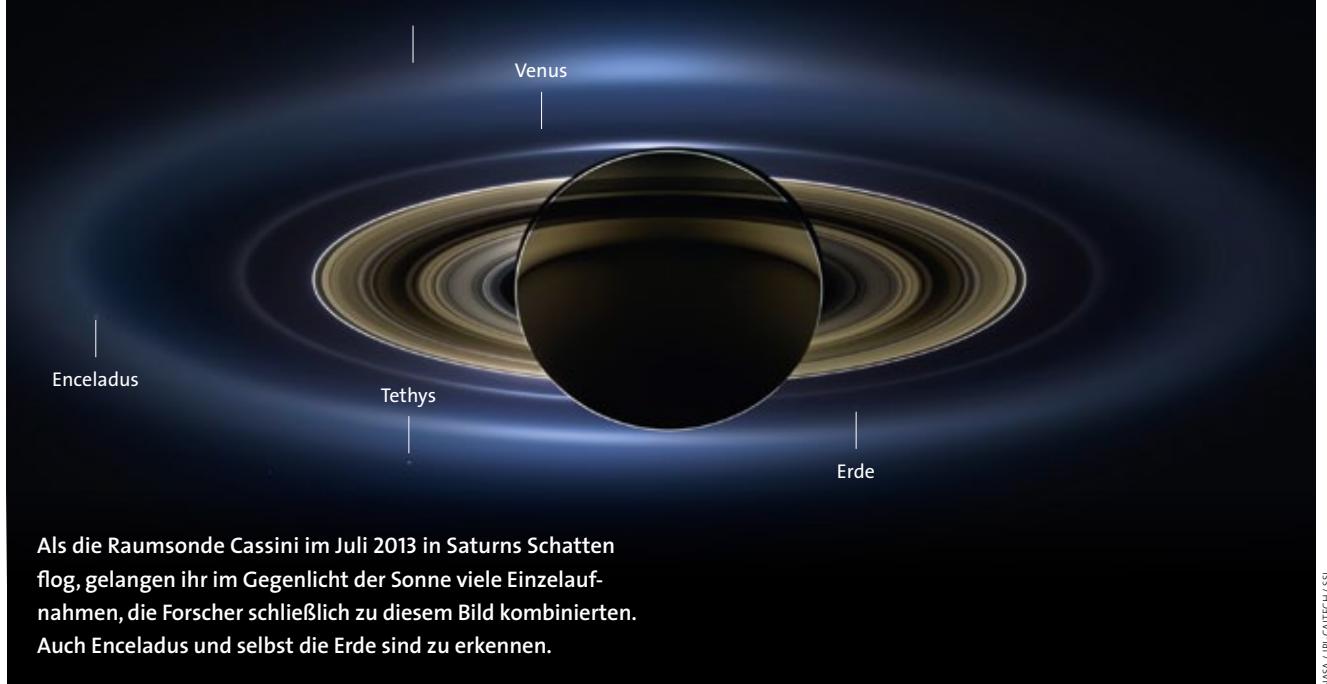
Vor-Ort-Messungen von Cassinis Staubdetektor CDA (Cosmic Dust Analyzer, siehe »Die Spur der Salze«) ergaben, dass die

meisten E-Ring-Partikel weniger als zwei Mikrometer groß sind. Der Ring reicht außerdem weiter, als Teleskope oder selbst Cassini Kamera zu erkennen geben. Dank der CDA-Messungen wissen wir, dass er sich sogar über die Umlaufbahn des größten Saturnmonds Titan hinaus erstreckt.

Seine hellste Stelle erreicht der E-Ring in einem Abstand von 3,9 Saturnradien von seinem Planeten, das sind 235 000 Kilometer. Weil fast exakt dort auch Enceladus seine Bahn zieht, gingen Wissenschaftler schon vor der Entdeckung der Eisfontänen davon aus, dass sich E-Ring und Enceladus gegenseitig beeinflussen.

Anders als die Hauptringe ist der E-Ring auch senkrecht zur Ringebene recht weit ausgedehnt, ein Umstand, der sich Partikeln mit geneigten Bahnen verdankt. Die Ringdicke wächst mit dem Abstand zu Enceladus sogar.





Als die Raumsonde Cassini im Juli 2013 in Saturs Schatten flog, gelangen ihr im Gegenlicht der Sonne viele Einzelaufnahmen, die Forscher schließlich zu diesem Bild kombinierten. Auch Enceladus und selbst die Erde sind zu erkennen.

NASA / JPL-CALTECH / SSI

tät Stuttgart betrieben. Die Studienobjekte des CDA-Teams, zu dem einer von uns (Frank Postberg) gehört, sind winzige Partikel verschiedenster Art, wie sie im Sonnensystem allgegenwärtig sind. Solch interplanetarer Staub wird in Mikrometern gemessen, also in tausendstel Millimetern.

In der Umgebung Saturs hatte der CDA die chemische Zusammensetzung der dort vorwiegend aus Wassereis bestehenden Teilchen untersucht. Das CDA-Team fand heraus, dass viele dieser Eispartikel salzige Tröpfchen des Enceladus-Meeres sind, die, schockgefroren zu winzigen Eiskörnchen,

mit den Fontänen am Südpol ins Weltall katapultiert wurden – bis hinauf zu Saturs E-Ring. Auf seinem Weg um den Gasplaneten hinterlässt der Mond also eine Spur von Eispartikeln, aus denen sich der E-Ring speist; ohne diesen beständigen Nachschub wäre er spätestens nach 1000 Jahren verschwunden. Allerdings erreicht nur ein Teil der Partikel den Ring: Langsamere Exemplare fallen zurück und rieseln als feiner »Schnee« auf den Mond. Weite Bereiche der südlichen Hemisphäre sind deshalb von einer teils mehr als 100 Meter hohen Schneeschicht bedeckt.

Die Spur der Salze

Kreuzt die Raumsonde Cassini die Bahn eines Staubeilchens, tritt der Cosmic Dust Analyzer (CDA) in Aktion. Der Staubdetektor kann Elemente und Moleküle bis zum 200-Fachen der Masse des Wasserstoffatoms detektieren und chemisch analysieren.

Betrieben wird das vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) finanzierte, 17 Kilogramm schwere Instrument vom Institut für Raumfahrtsysteme der Universität Stuttgart. In seinem Inneren ist eine Prallplatte aus Rhodium verankert. Trifft ein Partikel schnell genug auf dieses so genannte Target, typischerweise mit einer Geschwindigkeit von mehreren zehntausend Kilometern pro Stunde, formt sich eine Einschlagwolke aus Ionen des Partikels sowie des Targets. Ein starkes elektrisches Feld trennt dann die Ladungsträger und beschleunigt die positiven Ionen in Richtung eines Detektors, der sie zählt. Weil ihn die leichten Ionen früher als die schwereren erreichen – ihre Flugzeit ist proportional zur Wurzel ihrer Atommasse –, entspricht das Messsignal einem Massenspektrum; der Detektor ist also genau genommen ein Flugzeitmassenspektrometer.

Darüber hinaus verfügt das Instrument über einen High Rate Detector, der Einschlagrate und Teilchenmasse in besonders dichter Staubumgebung misst und bis zu etwa 10 000 Einschläge pro Sekunde registrieren kann.

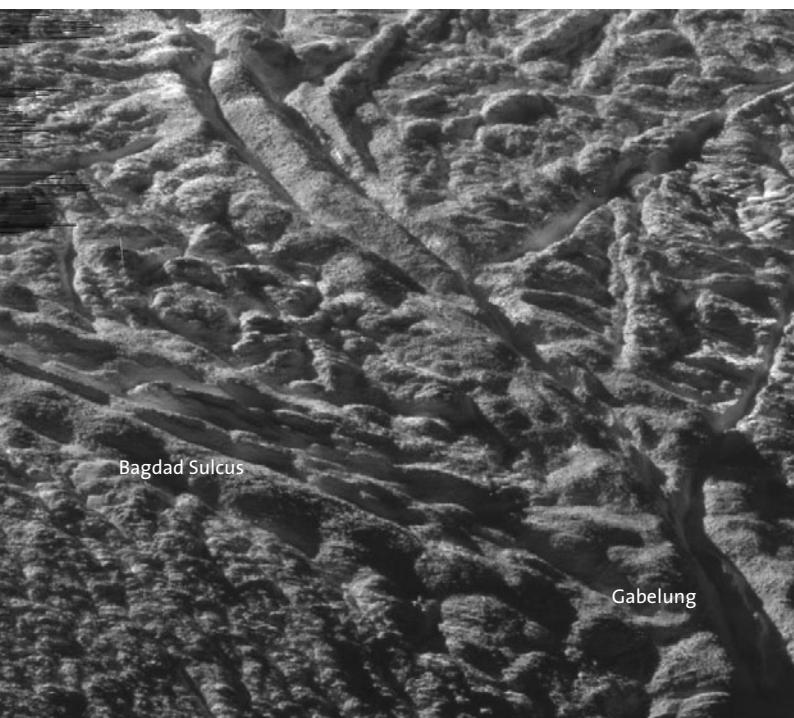
Die CDA-Analysen von 2009 ergaben, dass die von Enceladus ausgestoßenen Eispartikel zwar hauptsächlich aus Wassereis bestehen, oft aber auch Kochsalz sowie andere Natrium- und Kaliumsalze enthalten, bei Salzgehalten zwischen 0,5 und 2 Prozent. Dieser Befund ließ sich nur so deuten, dass die Salze ursprünglich aus dem Gesteinskern von Enceladus herausgelöst worden waren und in gefrorenen Tröpfchen des salzigen Gewässers ins Weltall gelangten.

Alle »trockenen« Szenarien der Fontänenentstehung, die einige Forscher ins Spiel gebracht hatten, hätten ausschließlich salzfreie Partikel erzeugt, wie sie beim Gefrieren von Wasserdampf entstehen. Diese Erklärungsansätze wurden durch die CDA-Daten also widerlegt.

Die Analyse der chemischen Zusammensetzung der Eisteilchen im Jahr 2009 belegte auch, dass die Salze darin zuvor aus Enceladus' Gesteinskern ausgewaschen worden waren. Damit war klar: Der Salzwasserozean steht mit dem Kern des Monds physisch in Kontakt. Eine wichtige Feststellung, denn Wasser kann nur dann als Lebenselixier wirksam sein, wenn es in der Lage ist, Minerale aus dem Gestein zu lösen und so eine präbiotische Chemie in Gang zu setzen. Den Kontakt zwischen Wasser und Gestein bestätigten 2014 dann auch die Radioanalysen von Enceladus' Gravitationsfeld.

Der Salzwasserfund beförderte Enceladus in die erste Liga der Himmelskörper, die Astrobiologen für möglicherweise habitabel, also für Lebensformen bewohnbar halten. In der Folge avancierte er darum zum wohl besterforschten Eismond des Sonnensystems: Cassini hat ihn inzwischen rund 20-mal überflogen und ist seinen Eswüsten dabei bis auf 25 Kilometer nahegekommen. Im Inneren ähnelt er offenbar dem Jupitermond Europa, unter dessen Eiskruste Forscher bereits seit der Galileo-Mission der 1990er Jahre einen mächtigen globalen Ozean vermuten. Zudem entdeckten sowohl CDA als auch INMS, Cassinis Massenspektrometer für die Vermessung von Neutralteilchen und Ionen, teils komplexe organische Substanzen im Eis und im Gas der Fontänen.

Die jüngsten Analysen der CDA-Messungen, die Postberg gemeinsam mit seinen Kollegen erst vor wenigen Wochen im Fachjournal »Nature« publizierte, haben nun erneut Erstaunliches zu Tage gefördert: Am Grund des Enceladus-Ozeans finden wahrscheinlich hydrothermale Prozesse statt. Denn dort, wo das Wasser mit dem Gesteinskern des Trabanten in Kontakt tritt, herrschen den Ergebnissen zufolge alkalische pH-Werte und Temperaturen von mindestens 90, womöglich sogar über 200 Grad Celsius.



Unsere Einsichten in die Natur der Grenzfläche zwischen Ozean und Gesteinskern verdanken wir CDA-Messungen von Nanoteilchen, die noch 100-mal winziger als die bereits erwähnten Eispartikel sind und oft nur aus wenigen tausend Atomen bestehen. Selbst die ultrafeinen Partikel im Zigarettenrauch sind um ein Vielfaches größer. Kombiniert man diese Messungen mit den Erkenntnissen japanischer Kollegen um Yasuhito Sekine von der Universität Tokio, die in geochemischen Laborversuchen die Bedingungen am Grund des Tiefenmeeres nachstellten, ergibt sich eine schlüssige Indizienkette für die hydrothermale Aktivität.

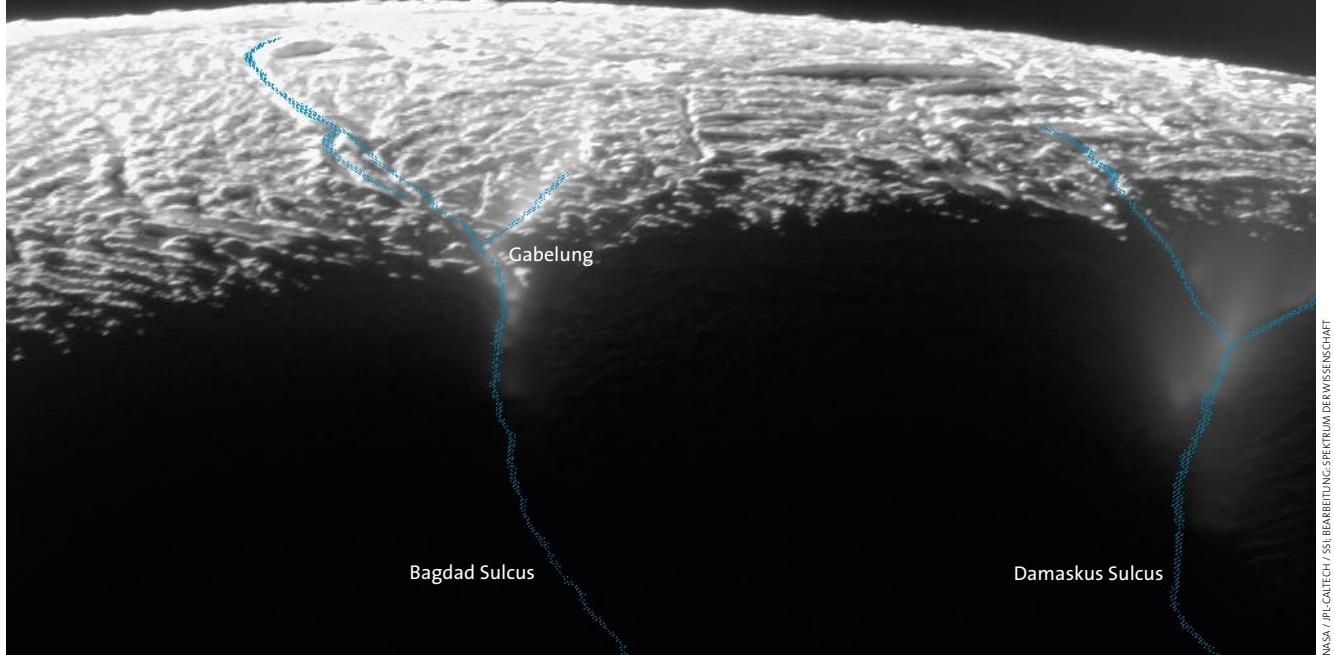
1 Die gemessenen Nanoteilchen stammen von Enceladus

Eigentlich liegen die Winzlinge, die der CDA bereits lange vor seiner Ankunft im Saturnorbit erstmals aufspürte, unter der Nachweisschwelle des Staubdetektors; nur wegen ihrer enormen Aufprallgeschwindigkeit können wir sie trotzdem messen. Hsiang-Wen Hsu von der University of Colorado in Boulder im US-Bundesstaat Colorado untersuchte ihre Flugbahnen, indem er zwei numerische Simulationen mit komplementären Ansätzen durchführte. In seiner »backward simulation« verfolgte er die Bahnen der Teilchen zu ihrem Ursprungsort zurück. Dabei verwendete er von Cassini gemessene Daten des Sonnenwinds, unter den sich die elektrisch geladenen Nanoteilchen außerhalb von Saturns Magnetosphäre mischen. Mit dem »ejection model« überprüfte er dann die Resultate der ersten Simulation. Letzteres Modell musste unter anderem realistisch beschreiben, bei welchen Prozessen die Partikel elektrisch aufgeladen werden; dies geschieht in der den Saturn umgebenden Zone aus Elektronen und Ionen, die Cassini ebenfalls vermessen hat. Übereinstimmend ergaben beide Ansätze, dass die Nanoteilchen Radien zwischen zwei und acht Nanometern haben und vorwiegend vom äußeren E-Ring aus, sieben bis zehn Saturnradien vom Planeten entfernt, in den interplanetaren Raum geschleudert worden waren. Der E-Ring wiederum wird, wie man schon weiß, von Enceladus erzeugt. Somit müssen auch die Nanoteilchen zuvor Teil des Eismonds gewesen sein.

2 Die Partikel setzen sich aus reinem Siliziumdioxid zusammen

Um den Anteil des statistischen Rauschens der Messung zu verringern und das eigentliche Signal zu verstärken, hat Postberg 32 Spektren von Nanoteilchen, in denen die Partikel

Mit einer Auflösung von sechs Metern pro Pixel zählt diese Aufnahme zu den schärfsten Bildern von Enceladus' Oberfläche. Weder die weniger als zehn Meter großen Austrittsöffnungen der Fontänen noch die Fontänen selbst sind darauf zu erkennen; Letztere werden erst im Gegenlicht sichtbar (Foto rechts oben). Was auf dem Foto als feine Körnung erscheint, halten die Forscher für hausgroße Eisblöcke, deren Entstehungsmechanismen noch völlig ungeklärt sind. (Links oben enthält die Aufnahme Bildfehler.)



Die Fontänen von Enceladus treten aus den »Tigerstreifen« aus, einem sich über den Südpol erstreckenden System aus hunderte Kilometer langen, tiefen Gräben, die parallel zueinander verlaufen. Die beiden blau hervorgehobenen Gräben, Bagdad Sulcus und Damaskus Sulcus (*sulcus*: lateinisch für Graben), sind die aktivsten. Die auffällige Gabelung von Bagdad Sulcus ist auch auf dem Foto links unten zu sehen.

besonders deutliche Signale hinterlassen haben, zu einem einzigen Summenspektrum überlagert. Die Auswertung zeigt, dass die Partikel höchstwahrscheinlich aus fast reinem Siliziumdioxid, SiO_2 , bestehen. Für den Gesteinskern eines planetaren Körpers ist diese Verbindung jedoch völlig untypisch: In Enceladus' Urgestein erwartet man metallhaltige Silikate, beispielsweise Olivin oder Pyroxen, die neben Silizium sowohl Eisen als auch Magnesium enthalten. Hingegen kann das metallfreie SiO_2 , das wir gemessen haben, erst durch Wechselwirkung solcher primordialer Gesteine mit heißem Wasser entstanden sein.

Diesen Entstehungsprozess von metallfreiem SiO_2 kennen Forscher auch auf der Erde, etwa von den hydrothermalen Quellen auf Island. Dort findet sich ebenfalls außergewöhnlich stark mit SiO_2 angereichertes heißes Wasser. Kühlte es ab, fällt SiO_2 aus und schwebt zunächst in Form winziger Partikel im Wasser. Lagern sich weitere Moleküle an, werden die Teilchen größer und schwerer, so dass sie schließlich zu Boden sinken – es sei denn, es herrschen alkalische, nicht allzu salzige Umgebungsbedingungen, die das Wachstum stoppen.

3 Auch im simulierten Tiefenmeer von Tokio bilden sich SiO_2 -Teilchen

In jahrelangen Laborexperimenten klärten unsere japanischen Forscherkollegen, unter welchen Bedingungen die

SiO_2 -Nanoteilchen auf Enceladus entstehen konnten. Wassergefüllte Druckbehälter am Institut für marine Geowissenschaft in Kashiwa, 30 Kilometer nördlich von Tokio, standen dabei stellvertretend für den Mondozean. Ihrem Inhalt wurden gelöste Natriumsalze und Ammoniak hinzugefügt, wie sie in den von Enceladus ausgestoßenen Gasen bereits nachgewiesen worden waren. Dabei achteten die Forscher darauf, die Gesamtmenge der gelösten Substanzen auf einen realistischen Wert einzustellen. Diese Lösung brachten sie schließlich in Kontakt mit verschiedenen Mischungen der Minerale Olivin (MgFeSiO_4) und Pyroxen (MgFeSiO_3), die den Gesteinskern von Enceladus repräsentierten. Dann überließen sie das System jeweils sechs bis neun Monate lang sich selbst, entnahmen regelmäßig Proben zur Analyse und wiederholten das Experiment bei verschiedenen Temperaturen zwischen 100 und 300 Grad Celsius.

So gelangen den Forschern wichtige Befunde. In den simulierten Ozeanen löste sich SiO_2 , dessen Konzentration durch Sekundärminerale bestimmt wurde, die sich bei Reaktionen des primordialen Gesteins mit dem heißen Wasser gebildet hatten. Sobald die Lösung abkühlte – was ihrem Aufsteigen in kühleres Ozeanwasser auf Enceladus entspricht –,

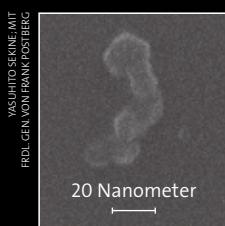
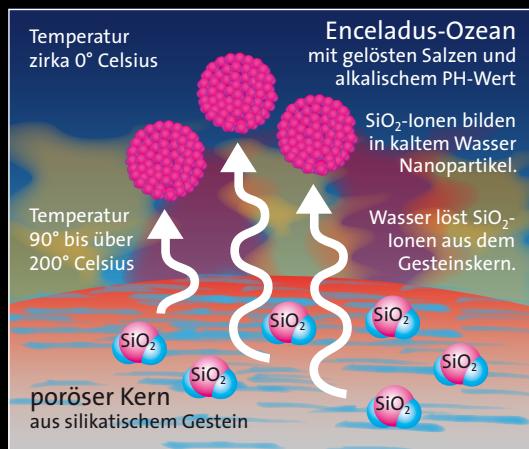
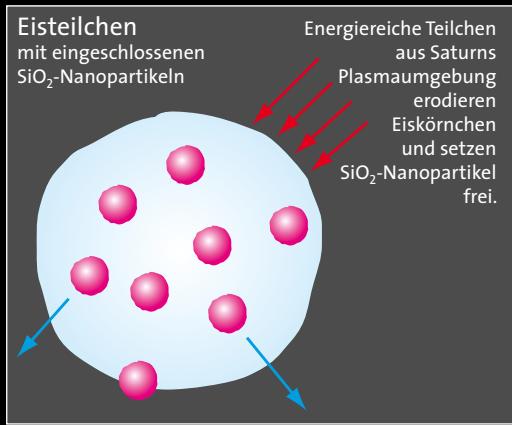
MEHR WISSEN BEI [Spektrum.de](http://spektrum.de)

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

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



Woher stammen die vom Staubdetektor der Cassini-Sonde gemessenen SiO₂-Nanoteilchen (pink)? Der Indizienkette der Forscher zufolge entstehen sie aus SiO₂-Ionen, die durch heißes Wasser aus dem Gesteinskern gelöst wurden und sich in kühlerem Wasser zu nanometergroßen Partikeln aneinanderlagern. Durch Ozean und Eiskruste hindurch gelangen die Teilchen dann an die Oberfläche des Eismonds, wo sie, eingebaut in Eisteilchen, mit den Fontänen ins All geschleudert werden.



Auch bei Experimenten, welche die Bedingungen am Grund des Enceladus-Ozeans simulierten, bilden sich aus gelösten SiO₂-Molekülen Nanopartikel (hier von einem Rasterkraftmikroskop aufgenommen), wenn die Temperatur abnimmt.

kam es zur Übersättigung mit SiO₂, das daraufhin in Form von Nanopartikeln ausfiel. Diese wuchsen wegen des alkalischen pH-Werts der Lösung aber nicht zu makroskopischen Körnern heran. Aus den Daten lässt sich extrapoliieren, dass die Wassertemperaturen an Enceladus' Gesteinsgrenzfläche mindestens 90 Grad Celsius betragen müssen, denn bei geringeren Temperaturen löste sich im Experiment nicht genügend SiO₂, so dass sich beim späteren Abkühlen auch nicht ausreichend Nanopartikel bilden konnten. Denkbar sind sogar Wassertemperaturen von deutlich über 200 Grad.

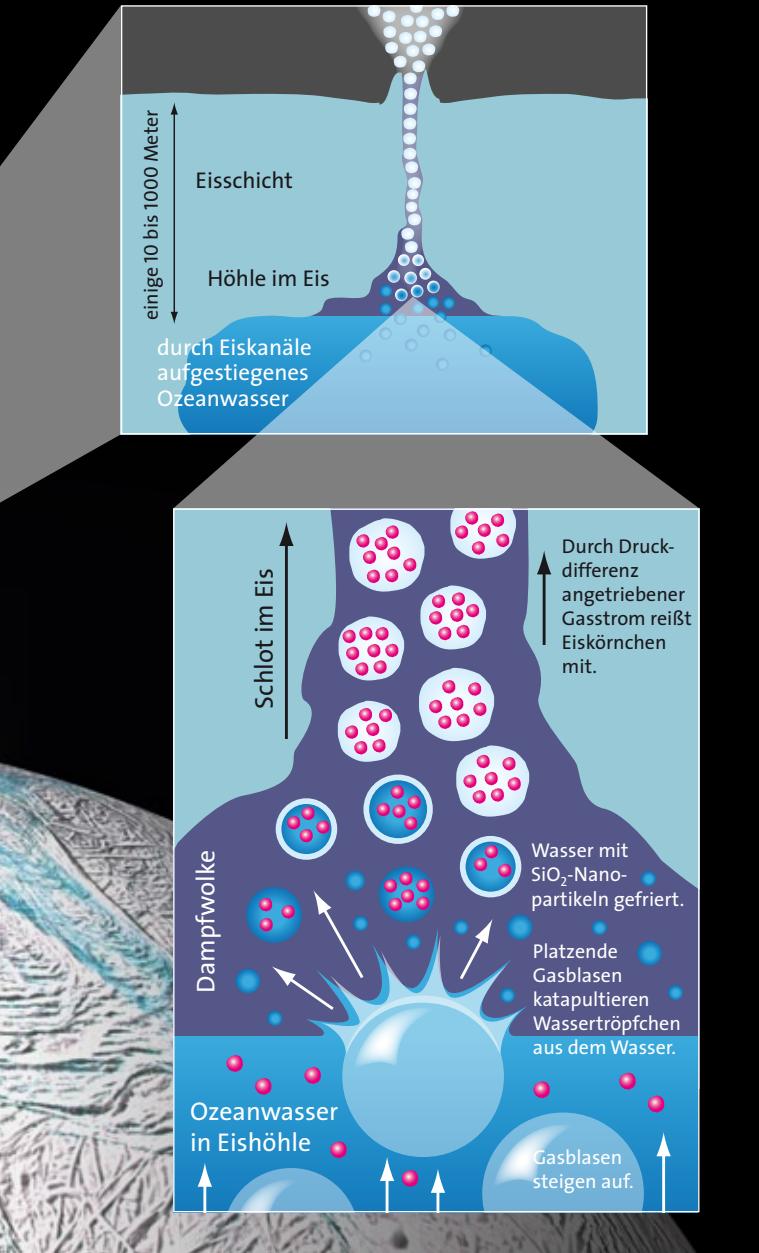
4 Im Enceladus-Ozean finden mächtige Umwälzungsprozesse statt

Im Experiment bildeten sich zunächst SiO₂-Teilchen mit Radien von rund zwei Nanometern. Die typische Größe der Nanopartikel von Enceladus, von denen wir Tausende mit unserem CDA-Instrument vermessen haben, liegt ebenfalls nur zwischen zwei und acht Nanometern, keines war größer als zehn. Sowohl die Laborexperimente als auch theoreti-

sche Arbeiten der japanischen Kollegen zeigen, dass die ursprünglich zwei Nanometer großen Teilchen bereits binnen einiger Monate, höchstens weniger Jahre zu dieser Größe heranreifen.

Daraus lassen sich zwei wichtige Dinge folgern. Zum einen müssen die vom CDA aufgefangenen Partikel erst kurze Zeit vor ihrer Messung entstanden sein, sonst wären sie größer gewesen als beobachtet; sie sind also keine Relikte vergangener hydrothermaler Aktivität, sondern zeugen von gegenwärtig ablaufenden Prozessen. Und zweitens: Dass sie in wenigen Monaten den rund 50 Kilometer weiten Weg vom Ozeangrund bis zur Oberfläche überwunden haben müssen, deutet klar auf mächtige Umwälzungen im Ozean hin.

Zusammengenommen bedeutet unsere Indizienkette: Im Tiefenmeer von Enceladus finden derzeit hydrothermale Prozesse statt. Besonders auch der alkalische pH-Wert von 9 bis 10,5 erinnert dabei an die Verhältnisse in »Lost City«. Möglicherweise kommt es auf Enceladus genau wie in den



Tiefen des Atlantiks zur so genannten Serpentinisierung. Bei dieser Reaktion, die bei den in Kashiwa durchgeführten Experimenten ebenfalls auftrat, reagiert Gestein mit Wasser zu Serpentinmineralen, wobei molekularer Wasserstoff und vor allem viel Wärme frei wird – dies könnte die hohen Temperaturen erklären.

Wie gelangen Nanopartikel, Wasser und Dampf nun aber ins All? Ihr Weg nach oben führt zunächst durch den rund zehn Kilometer mächtigen Ozean. Begrenzt wird dieser durch eine 30 bis 40 Kilometer dicke Eisschicht, die wahrscheinlich von wassergefüllten Rissen durchzogen ist. Das vergleichsweise warme Eis in dieser Schicht ist gleich irdischen Gletschern zwar plastisch verformbar. Durch seine Füllung mit Wasser wird es allerdings hinreichend gegen die an ihm zerrenden Gezeitenkräfte stabilisiert, so dass das mit Nanopartikeln angereicherte Salzwasser darin aufsteigen kann.

Wegen des Dichteunterschieds zwischen Eis und Wasser dürfte Letzteres nach den hydrostatischen Gesetzen jedoch

nur bis auf einige Kilometer an die äußere Grenze der eisigen Mondoberfläche herankommen. Der so genannte Champagner-Effekt hilft ihm aber vermutlich noch weiter hinauf. Während des Aufstiegs durch die wassergefüllten Risse nimmt nämlich der Druck ab, wodurch Kohlendioxid freigesetzt wird, das zuvor im Wasser gelöst war. Die Gasblasen sorgen also entlang des gesamten Wegs nach oben für zusätzlichen Auftrieb, der das Salzwasser schließlich eine Höhe von vielleicht einigen hundert Metern unter der Mondoberfläche erreichen lässt.

Dort, so vermuten wir, sammelt es sich in Eishöhlen. Aus der Oberfläche des Wassers werden nun, wie bei perlendem Sekt, winzige Tröpfchen herausgerissen und bilden feinste Nebelwolken. Schnell gefrieren die Tröpfchen zu mikrometergroßen Eiskörnchen, die auch die kleinen Nanopartikel wie Rosinen in einem Brötchen einschließen. Der Unterdruck, der infolge der geringen Distanz zum Vakuum des Weltraums herrscht, lässt darüber hinaus große Mengen Wasser verdampfen. Durch Kanäle im Eis, die hier oben nicht mehr mit Wasser gefüllt sind, zieht der Dampf wie durch einen Kamin bis zur Mondoberfläche hinauf und reißt dabei die kleinen Teilchen mit sich. Am Ende werden sie von den Fontänen emporgeschleudert.

Der Beschuss der Eiskörnchen mit energiereichen Teilchen setzt die Nanopartikel wieder frei

Rund 200 Kilogramm Gas und Eis gelangen so pro Sekunde ins All. Die schnellsten der Eisteilchen bekommen genug Energie mit, um Saturns E-Ring zu erreichen. Hier sind sie der korrosiven Plasmaumgebung des Planeten ausgesetzt und werden mit energiereichen geladenen Partikeln bombardiert. Der Beschuss setzt nach und nach die eingeschlossenen Nano-SiO₂-Rosinen frei, die nun ein dynamisches Eigenleben beginnen. Sie werden vom Plasma innerhalb weniger Stunden oder Tage aufgeladen und so zum Spielball elektromagnetischer Kräfte. Verleiht ihnen Saturns Magnetosphäre die für den endgültigen Abschied vom Ringplaneten nötige Fluchtgeschwindigkeit, mischen sie sich anschließend unter den Sonnenwind. Mit bis zu einer Million Kilometer pro Stunde sind sie dann unterwegs – das ist rund ein Prozent der Lichtgeschwindigkeit – und verschwinden in den Weiten des Sonnensystems.

Doch kehren wir zurück zu Enceladus. Neben dem CDA nehmen auch andere Cassini-Instrumente regelmäßig die geologisch aktive Südprovinz ins Visier. Dazu gehören neben den beiden Infrarot-Instrumenten, dem Composite Infrared Spectrometer (CIRS) und dem Visible and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS), auch die Bordkamera (Imaging Sub System, ISS). Die mit diesen Instrumenten gewonnenen Ergebnisse fassten US-Kollegen im Sommer 2014 in einer Publikation zusammen. Mit bildgestützten Methoden, wie sie auch geodätischen Messungen zu Grunde liegen, hatten die Forscher die Positionen zahlreicher Fontänen vermessen. Mit den Infrarot-Instrumenten stellten sie dann fest, dass die Temperaturen an vielen Austrittsorten teilweise mehr als

100 Grad über dem Umgebungsniveau von minus 200 Grad Celsius liegen. Laut den VIMS-Daten sind die Austrittsöffnungen mit weniger als zehn Meter Durchmesser zudem sehr klein. Daraus lässt sich folgern, dass ihre ungewöhnlich hohen Temperaturen durch so genannte latente Wärme verursacht werden, die frei wird, wenn der aufsteigende Dampf an den kalten Eiswänden gefriert.

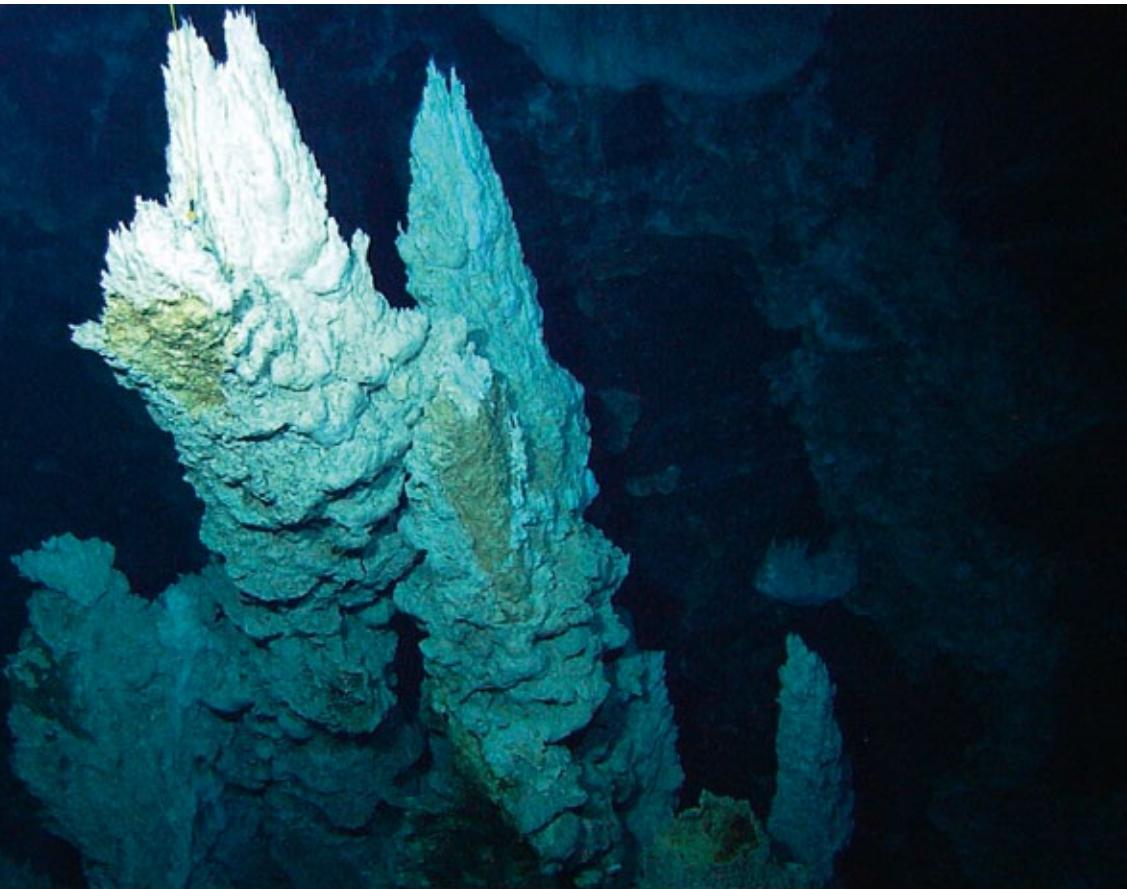
Unklar bleibt aber weiterhin, woher die Wärme letztlich stammt, die den sonnenfernen Ozean flüssig hält. Der offensichtlichste Kandidat wäre eine Gezeitenheizung, wie sie im Jupitersystem für die vulkanische Aktivität auf dem Mond Io und für den bereits erwähnten Ozean von Europa verantwortlich ist. Die Wirkung eines solchen Mechanismus lässt sich immer dann beobachten, wenn ein Trabant auf seinem elliptischen Orbit rhythmisch den Abstand zu seinem Planeten ändert: Dessen Schwerkraftwirkung deformiert ihn in wechselndem Maß, was zu Reibungsprozessen in Mantel und Kruste und damit zu Wärme führt.

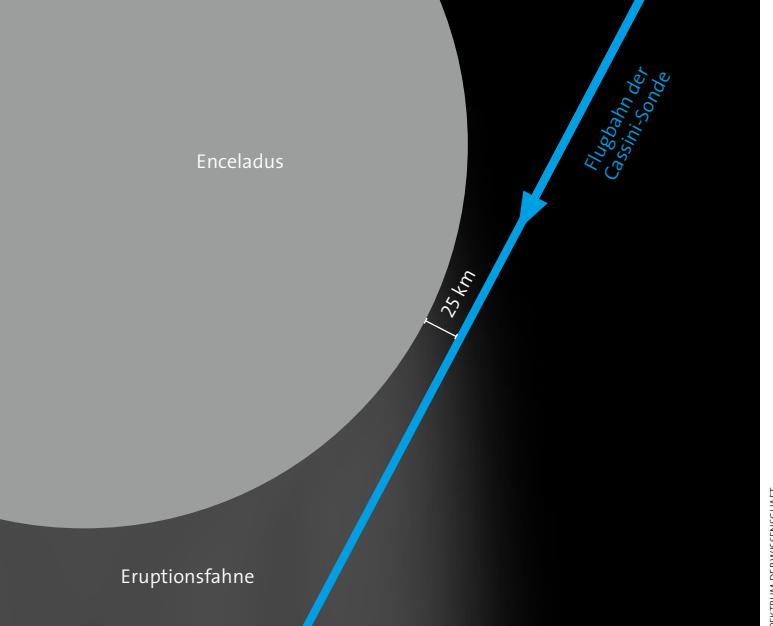
Ragen auch am Grund des Enceladus-Ozeans solche Schlote empor? Die Aufnahme stammt vom Hydrothermalfeld »Lost City« im mittleren Atlantik. Hier treten aus rund 30 dieser bis zu 60 Meter hohen Kalksteingebilde stark alkalische Lösungen mit Temperaturen bis zu 90 Grad Celsius aus. Vielen kleinen wirbellosen Tieren wie etwa Schnecken und Muscheln bieten sie einen Lebensraum.

Dass Saturns Gezeiten in der Tat eine wichtige Rolle spielen, hatten Analysen von VIMS-Daten schon 2013 nahegelegt; die Bordkamera der Sonde bestätigte sie 2014. Den Daten zufolge schwankt die Helligkeit der Eruptionsfahne und somit die Menge des ausgestoßenen Materials periodisch. Offenbar öffnen sich die Wasser und Dampf führenden Spalten und Schlotte in Enceladus' rissigem Eismantel mal mehr und mal weniger, abhängig vom Zerren der Gezeitenkräfte. Ein einfaches Modell des Effekts kann die periodische Helligkeitsänderung gut nachbilden, versagt bislang allerdings dabei, das Geschehen auch zeitlich korrekt vorherzusagen.

Allerdings untermauern neuere Analysen, dass mindestens 5000 Megawatt Heizleistung notwendig sind, um die Wärmeabgabe von Enceladus zu erklären – fünfmal mehr, als die Gezeitenheizung liefern könnte. Da dem Mond also zu wenig Energie zugeführt wird, als dass er seine Aktivität dauerhaft aufrechterhalten könnte, stellt sich die Frage, ob seine gegenwärtige Aktivität nur eine vorübergehende Erscheinung ist. Modellrechnungen lassen dies durchaus denkbar erscheinen. Womöglich wechselt der Mond zwischen aktiven und passiven Perioden, die jeweils viele Millionen Jahre anhalten.

Welche Rolle spielt aber die Wärme aus der Serpentinisierung? Besondere Bedeutung bekäme sie, falls Enceladus' Gesteinskern porös ist. Dann könnte es sein, dass Wasser tief in den Kern eindringt und dort ein riesiges Reservoir für





Der fünfte Vorbeiflug Cassinis an Enceladus am 9. Oktober 2008 war spektakulär: Mit einer Geschwindigkeit von 17,7 Kilometern pro Sekunde näherte sich die Sonde dem Eismond auf bis zu 25 Kilometer. Kurz vor dem Moment der größten Annäherung trat sie dabei in Enceladus' Eruptionsfahne ein. Die spätere Datenauswertung zeigte, dass im unteren Bereich der Fahne salzhaltige Teilchen häufiger sind als in größerer Entfernung vom Mond. Damit war den Wissenschaftlern endgültig klar: Hier ist flüssiges Wasser im Spiel.

die Wärme erzeugenden Serpentinisierungsreaktionen erschließt. Genau dies legen die erwähnten neuen Gravitationsfeldmessungen tatsächlich nahe. Ihnen zufolge beträgt die Kerndichte nur 2,2 bis 2,5 Gramm pro Kubikzentimeter und damit weniger, als man für kompaktes Gestein erwarten würde. Dieses Ergebnis erscheint durchaus plausibel: Enceladus' Schwerkraft ist mit gerade einmal 1,2 Prozent des irdischen Werts sehr gering, so dass das Material, das auf seinem Kern lastet, diesen nicht besonders stark komprimieren kann.

Wie wichtig die Serpentinisierung ist, soll schon im Oktober 2015 bei Cassinis 21. Enceladus-Vorbeiflug überprüft werden, wenn die Bahn der Sonde durch die von den Fontänen gespeisten Eruptionswolken führt. In ihnen wird das INMS-Instrument nach einem Beleg für diese Hypothese fahnden: nach molekularem Wasserstoff, der bei der Reaktion in großer Menge frei wird.

Während die schwierige Frage nach Enceladus' rätselhafter Energiequelle aber möglicherweise noch lange unbeantwortet bleiben wird, sollen schon die kommenden Missionen überprüfen, ob der Saturnmond tatsächlich über alle Ingredienzien für ein extraterrestrisches Habitat verfügt. Dabei konzentrieren sich die Forscher weiterhin auf Ozeanproben, die von den Fontänen des Enceladus vor die Instrumente der Raumsonden katapultiert werden. Modernere Staubdetektoren verfügen jedoch über Massenspektrometer, die der mehr als 20 Jahre alten CDA-Generation weit überlegen sind. Mit

ihnen kann man auch nach Aminosäuren fahnden und die relative Häufigkeit von deren Vorkommen bestimmen – vielleicht werden wir also bald wissen, ob Enceladus belebt ist wie »Lost City«. Immer mehr Forscher nehmen jedenfalls an, dass es auch auf der Erde alkalische Hydrothermalquellen waren, welche die allerersten Lebensformen hervorgebracht haben.

Schon jetzt wirft der kleine Trabant aber eine sehr grundständliche Überlegung auf. Leben vermutet man bisher vor allem auf erdähnlichen Exoplaneten, doch ist das vielleicht nur die Spitze des Eisbergs. Wenn selbst an Orten wie dem eigenen Enceladus habitable Bedingungen herrschen, ist damit zu rechnen, dass wir die Lebensfreundlichkeit des Weltalls bislang drastisch unterschätzen. ~

DIE AUTOREN



Frank Postberg (links) ist Mitglied im Wissenschaftsteam der Cassini-Mission und leitet die Auswertung der Massenspektren des Cosmic Dust Analyzer. Gleichermaßen in Astronomie, Physik und Chemie zu Hause, beschäftigt sich der

Planetenforscher sowohl an der Universität Heidelberg als auch am Institut für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart vor allem mit kosmischem Staub und den Eismonden des Sonnensystems. **Thorsten Dambeck** ist Wissenschaftsautor und promovierter Physiker. Er ist auf planetologische und astronomische Themen spezialisiert. Enceladus sah er erstmals 1981 – im Fernrohr, bei einer Kantenstellung der Saturnringe.

QUELLEN

- Hsu, H.-W., Postberg, F., Sekine, Y. et al.:** Ongoing Hydrothermal Activities within Enceladus. In: Nature 519, S. 207–210, 2015
- Iess, L. et al.:** The Gravity Field and Interior Structure of Enceladus. In: Science 344, S. 78–80, 2014
- Martin, W.F. et al.:** Energy at Life's Origin. In: Science 344, S. 1092–1093, 2014
- Postberg, F. et al.:** Sodium Salts in E-Ring Ice Grains from an Ocean below the Surface of Enceladus. In: Nature 459, S. 1098–1101, 2009

LITERATURTIPPS

- Porco, C.:** Enceladus – rätselhafter Saturnmond. In: Spektrum der Wissenschaft 6/2009, S. 24–33
Auch die Leiterin des US-amerikanischen Imaging Science Team der Cassini-Huygens-Mission berichtete schon in »Spektrum«.
- Spencer, J.R., Nimmo, F.:** Enceladus: An Active Ice World in the Saturn System. In: Annual Review of Earth and Planetary Sciences 41, S. 693–717, 2013
Lesenswerter Überblick über die schnellen Fortschritte bei Enceladus' Erforschung

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1343326

Lesen Sie in der Juli-Ausgabe von »Spektrum der Wissenschaft« mehr über bewohnbare fremde Welten: Supererden könnten sogar noch lebensfreundlicher sein als unser Heimatplanet.

Transparenz durch Nässe

Farblose Textilfasern wirken optisch wie eine blickdichte Nebelwand und können Gewebe daher weiß erscheinen lassen. Wasser macht diesen Effekt aber zunichte.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

»... Relationen und Ähnlichkeiten zwischen Dingen zu finden, die sonst niemand sieht ...«

Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)

»Der Wind stößt in die nassen Wäschestücke hinein und bringt ein schönes Knattern hervor«, schreibt der Schriftsteller Wilhelm Genazino, ein genauer Beobachter auch profaner Alltagsdinge. »Manchmal bauscht ein einzelner kräftiger Windstoß die Laken hintereinander auf. Eine halbe Stunde vergeht, dann ist die Wäsche trocken und weiß.« Erst dann? Sollte sie nicht schon in dem Moment reinweiß erscheinen, in dem man sie frisch gewaschen aus der Waschmaschine holt?

Die Frage ist gerechtfertigt: Warum muss ein Hemd erst trocknen, damit es wirklich weiß strahlt? Oder andersherum: Wie schafft es völlig farbloses Wasser, weiße Wäsche dunkel erscheinen zu lassen?

Wenn das Gewebe eines weißen Hemds keine Farbpigmente enthält – was übrigens die Regel ist –, erscheint es aus demselben Grund weiß, wie dies auch Schnee und Nebel tun. Aber deren Farbe ist ebenso wenig selbstverständlich. Denn Schnee ist eine Ansammlung winziger Eiskristalle, Nebel besteht aus Wassertröpfchen. Sowohl Eis als auch Wasser sind allerdings farblos und im Prinzip durchsichtig wie Glas.

Entscheidend sind hier aber die Grenzschichten zwischen unterschiedlichen Medien. Wenn ein Objekt unter Wasser liegt oder im Eis eingefroren ist, durchquert das von ihm reflektierte Licht zunächst das jeweilige Medium und tritt an dessen Grenze in die Luft der Umgebung über. Dabei wird das Licht gebrochen, wobei es seine Richtung ein wenig ändert und teilweise ins Medium zurückreflektiert. Bei jeder Wechselwirkung wird zudem ein Teil des Lichts absorbiert, im Fall transparenter Medien jedoch nur ein kleiner.

Das genaue Ausmaß dieser Effekte hängt von den Brechungsindizes der beteiligten Medien ab. Unterscheiden sie sich stark, wird das auf die Grenzfläche treffende Licht auch stark von der ursprünglichen Richtung abgelenkt. Das an der Grenzfläche reflektierte und gebrochene Licht sorgt dafür, dass das transparente Medium überhaupt in Erscheinung tritt: Einerseits wird es durch das reflektierte Licht sichtbar, andererseits sorgt es durch die Brechung für ungewohnte Anblicke wie zum Beispiel den berühmten Strohhalm im Glas, der an der Wasseroberfläche abzuknicken scheint.

Plötzlich unsichtbar

Je mehr sich ein Gegenstand optisch an das ihn umgebende Medium angleicht, je ähnlicher also die Brechungsindizes sind, desto mehr verliert er dagegen an Sichtbarkeit. Taucht man ein Reagenzglas aus Fiolax, einem speziellen Borosilikatglas mit einem Brechungsindex von etwa 1,47, in ein durchsichtiges Gefäß mit Olivenöl (Brechungsindex 1,46) und füllt es ebenfalls mit Olivenöl, wird es regelrecht unsichtbar (siehe Foto rechts). Sind die Indizes identisch, ist das Ergebnis noch eindeutiger: Schüttet man Wasser in Wasser, verschwindet es darin spurlos.

Wie steht es nun um Wasser, das in Form kleinster Tröpfchen als Nebelwand auftritt? Wirft ein vor oder hinter

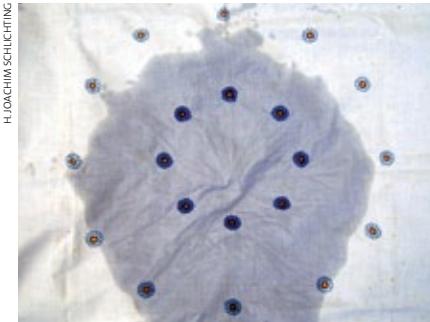
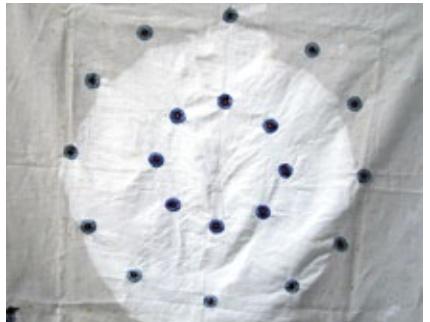
Auch wenn man es nicht sieht: Das innen stehende Reagenzglas aus dem Spezialglas Fiolax reicht bis an den Grund des mit Olivenöl gefüllten Wassergefäßes. Grund für sein »Verschwinden« sind die fast identischen Brechungsindizes von Öl und Fiolax.

der Wand gelegener Gegenstand Licht auf die Nebeltröpfchen, wird es an ihren Grenzflächen viele Male in unterschiedlichste Richtungen reflektiert, bevor es am Ende vielleicht doch noch unsere Augen erreicht. Zu diesem Zeitpunkt hat es aber längst jegliche Information über seine Herkunft verloren. Die Nebelwand erscheint also ab einer bestimmten Dicke und Dichte schlicht undurchsichtig. Dahinterliegende Objekte sind dann nicht mehr zu erkennen.

Außerdem mischen sich die Farben im Verlauf der vielen Reflexionen perfekt und addieren sich zu Weiß. Nicht zu einem ganz reinen Weiß allerdings: Weil an jeder Grenzfläche auch ein wenig Licht absorbiert wird, zeigt sich die Nebelwand in einem mehr oder weniger hellen Grau. Sie ist also etwas dunkler als Weiß, aber genauso farblos. Aus demselben Grund erscheint Schnee hellgrau bis weiß, und Glasscheiben zerbersten bei einem kräftigen Schlag in winzige weiße Brösel.



H. JOACHIM SCHLICHTING



Ein feuchter Fleck auf einem Tischtuch lässt mehr Licht hindurch als seine trockene Umgebung. Je nach Einstrahlungsverhältnissen lässt ihn das heller oder dunkler wirken. Im Bild links scheint die Sonne von hinten auf das Tuch, im Bild rechts steht sie im Rücken des Beobachters.

Im weißen Hemd kommen letztlich dieselben Effekte zum Tragen wie in einer blickdichten Nebelwand. Oft besteht ein solches Kleidungsstück aus transparenten Baumwoll- oder Acrylfäden, die in unterschiedliche Richtungen orientiert und überdies in winzige Fasern und Fädchen aufgefächert sind. Ein Teil des auf das Hemd fallenden Lichts wird an den Grenzflächen zwischen Luft (Brechungsindex nahe 1) und Fasern (Baumwolle: Brechungsindex etwa 1,52) in alle Richtungen reflektiert, gelangt also auch in unsere Augen. Ein weiterer Teil wird in das Hemd hinein gebrochen, durchdringt es und erreicht die Haut. Auch von ihr wird ein Teil absorbiert und ein anderer diffus reflektiert. Am Ende verleiht die Summe all dessen, was nach unzähligen Reflexionen, Ablenkungen und Absorptionen unsere Augen erreicht, dem Gewebe seine weiße Farbe.

Wasser verändert die Situation grundlegend. Dringt es zwischen die Fasern, verdrängt es dabei Luft. Mit seinem Brechungsindex von 1,33 ist es den Fasern aber optisch ähnlicher als Luft. Dadurch sinkt der Einfluss der Grenzflächen: Die Zahl der Reflexionen und Absorptionen an den Fasern verringert sich, und es gelangt ein größerer Anteil des Lichts auf geraderem Weg durch das Hemd hindurch bis auf die Haut. Diese absorbiert schließlich, abhängig von der jeweiligen Hautpigmentierung, einen beträchtlichen Teil der Strahlung. So kehrt weniger Licht zurück, und der nasse Fleck erscheint dunkler.

Dabei macht es einen Unterschied, ob das nasse Hemd den Körper locker umgibt oder direkt an der Haut klebt. Bleibt Raum zwischen Haut und

Hemd, so verteilt sich das von der Haut kommende diffuse Licht über eine mehr oder weniger große Fläche des Gewebes. Weil es dort reichlich Gelegenheit zu weiteren Reflexionen und Absorptionen gibt, erscheint das nasse Hemd also relativ dunkel, aber undurchsichtig.

Liegt es hingegen direkt auf der Haut, wirkt es nahezu durchsichtig. In diesem Fall wird das von der Haut zurückfallende Licht nämlich nicht diffus in viele Richtungen geworfen, sondern kehrt nur wenig geschwächt und ohne größere Umwege direkt durch das Gewebe zurück und gelangt in unsere Augen.

Erscheint die nasse Stelle als dunkler Fleck? Oder als helle Fläche?

Das Phänomen der durch Nässe hervorgerufenen Transparenz kann man sich übrigens besonders gut veranschaulichen, wenn man einfach ein weißes Tuch mit einem großen Wasserfleck vor sich hält (Fotos oben). Hat man die Sonne im Rücken, sieht man die nasse Stelle als dunklen Fleck, weil sie das Sonnenlicht im Vergleich zu benachbarten trockenen Stellen leichter hindurchlässt, statt es in unsere Augen zu reflektieren. Hält man das Hemd jedoch gegen die Sonne, ist der Eindruck aus denselben Gründen gerade umgekehrt. Das durch den transparenteren Bereich hindurchgehende Sonnenlicht scheint recht direkt in unsere Augen, so dass der nasse Fleck heller wirkt als seine trockene Umgebung.

Bei farbigen Hemden, also solchen, die Pigmente enthalten, liegen die Verhältnisse etwas komplizierter. Die Pigmente absorbieren jeweils einen Teil aus dem Spektrum des weißen Lichts

und reflektieren den Rest. Ein rotes Hemd erscheint rot, weil es nur rotes Licht zurückwirft. Die feinen Fasern der Gewebefäden reflektieren allerdings nicht nur Rot, sondern sämtliche Farben; sie fügen also zusätzlich diffuses weißes Licht hinzu. Dem Rot eines Hemds ist daher immer auch etwas weißes Licht beigemischt, so dass es ein wenig heller erscheint, als es in Wirklichkeit ist. Gelangt allerdings Wasser auf ein Hemd mit Farbpigmenten, kleben die kleinen Fasern zusammen; damit verringert sich auch die diffuse Reflexion weißen Lichts. Entsprechend dunkler und kräftiger erscheint das Rot.

Natürlich beschränken sich unsere Überlegungen nicht nur auf Hemden. Auch Salz, Zucker oder Schnee werden transparenter, wenn man Wasser hinzufügt, und erscheinen auf dunklem Hintergrund entsprechend dunkler. Mit Papier gelingt der Trick ebenfalls: Wird eine Zeitungsseite nass, schimmert die Schrift auf ihrer Rückseite hindurch. Wer dagegen Briefumschläge durchsichtig werden lassen will, kommt mit Wasser nicht sehr weit. Stattdessen muss er sie mit Öl tränken, das dem Briefpapier zumindest optisch stark ähnelt. ~

DER AUTOR



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

Dieser Artikel und Links im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1343327

Wer saß einst auf Mykenes Thron?

Trutzige Burgen, kostbare Grabbeigaben, Freskenmalerei und eine eigene Schrift – die nach dem Fundort Mykene benannte frühgriechische Kultur beeindruckt uns bis heute. Doch ihre Regierungsform stellt Archäologen vor Rätsel. Herrschte ein Großkönig über den gesamten Kulturraum, oder teilten sich die mehrere Herrscher die Macht?

Von Josef Fischer

*»Ohne Geräusch, da erhob sich der mächtige Fürst Agamemnon
Samt dem Szepter; das hatte Hephaistos kunstvoll gebildet;
Und Hephaistos schenkte es Zeus, dem Herrscher Kronion,
Zeus aber schenkte es fort seinem Boten, dem Argoserwürger,
Hermes, der Fürst, wieder gab es dem rossetummelnden Pelops,
Pelops gab es an Atreus weiter, dem Hirten der Völker,
Atreus ließ es verscheidend dem herdenreichen Thyestes,
Aber Thyest' hinterließ es zu tragen dem Herrn Agamemnon.«*

(Homer, Ilias, 2. Buch, Verse 101–106)

Angetan mit Brustharnisch, Schild und bronzenen Schwertern, auf dem Haupt einen mit Zähnen wilder Eber besetzter Helm – so ließ Homer die Krieger des griechischen Festlands gegen Troja und seine Verbündeten aufmarschieren. Angeführt von Fürsten und Königen hätten sie in blutigen Zweikämpfen um Ehre und Beute gerungen. Der mächtigste unter den griechischen Königen sei Agamemnon von Mykene gewesen: der Oberbefehlshaber der Invasionsarmee, die Homers »Schiffskatalog« zufolge aus den Kontingenten von 29 Königreichen bestand.

Schon in der griechischen Antike war dieser Krieg nur noch ferne Vergangenheit. Über deren geschichtliche Wahrheit bestand gleichwohl kein Zweifel, wie man etwa den Schriften des fast ein Jahrtausend nach Homer lebenden

Pausanias entnehmen kann. Dessen Reisehandbuch sowie »Ilias« und »Odysssee« im Gepäck, machte sich der Troja-Ausgräber Heinrich Schliemann (1822–1890) auch daran, Agamemmons Mykene wiederzuentdecken. In seiner Nachfolge erforschen Altertumswissenschaftler verschiedener Disziplinen bis heute die mykenische Zivilisation, die in der späten Bronzezeit zwischen 1400 und 1200 v. Chr. ihre höchste Blüte erreichte und dann aus noch nicht vollständig verstandenen Gründen unterging. Längst haben sich die Forscher von den Archäologiepionieren gelöst und hinterfragen deren Deutungen. Insbesondere die Annahme eines Königiums als vorherrschende Regierungsform ist in die Kritik geraten.

Es schien naheliegend, denn das markanteste Kennzeichen jener Epoche sind die Burgen mit ihren zyklopischen



Mauern, die ihre neuzeitlichen Entdecker mit den »Palästen« der homerischen Epen gleichsetzten. Solche monumentalen Zentren erhoben sich in vielen Regionen (siehe Karte S. 46), auch auf der Insel Kreta. In anderen Gebieten Griechenlands kamen keine derartigen Ruinen zu Tage, doch orientierten sich die Zeitgenossen dort durchaus am kulturellen Vorbild der Palaststaaten, wie beispielsweise Siegelfunde zeigen. Um die Burgen und im Land verteilt lagen Siedlungen unterschiedlicher Größe und Gehöfte.

Wer sonst, wenn nicht ein Monarch, könnte ein solches Gebiet regiert haben? Dafür spricht ein System von Straßen, Kanälen, Dämmen und Brücken – dergleichen erforderte etliche Arbeitskräfte und gut bezahlte Spezialisten. In den mykenischen Zentren entstanden zudem herausragende

AUF EINEN BLICK

DAS RÄTSEL DES »Wanax«

1 Zwischen 1450 und 1200 v. Chr. wurden auf dem griechischen Festland **kolossale Burgen** errichtet. Die größte dieser Anlagen stand in **Mykene**.

2 In ihrem Aufbau ähnelten sich die Festungen. Insbesondere besaßen die meisten wahrscheinlich einen zentralen Bau mit einem Säulensaal. In diesem so genannten **Megaron** befanden sich ein Thron sowie eine Feuerstelle, die wohl Ritualen diente.

3 Die meisten Forscher sehen einen als »wanax« bezeichneten Regenten auf dem Thron, obwohl die Quellen nicht eindeutig sind. Unklar ist auch, ob einer dieser lokalen Herrscher als **Großkönig** den gesamten mykenischen Kulturräum kontrollierte.



Kunstwerke, und man entwickelte die seit ihrer Entzifferung 1952 durch den Architekten Michael Ventris (1922–1956) und den Philologen John Chadwick (1920–1998) gut verstandene Silbenschrift Linear B. Wäre dergleichen ohne eine Zentralgewalt denkbar? Gleiches gilt für die Außenwirkung: In der Palastzeit prägte die mykenische Kultur nicht nur Kreta und die Kykladen. Auch auf Rhodos, Kos und in Kleinasien wurden Stützpunkte errichtet, wie entsprechende Funde belegen. Und die Aufzeichnungen der Hochkulturen jener Zeit – Ägypten und das hethitische Reich – bergen zahlreiche Hinweise auf diplomatische Kontakte.

Einige Forscher bezweifeln aber eine solche Zentralmacht und sehen stattdessen Gruppen von Aristokraten an der Regierungsspitze. Andere glauben zwar an eine herausragende Rolle Mykenes, jedoch im Kreis unabhängiger Fürstentümer.

Die Monumentalität der Paläste wie der Gräber spricht dafür, dass einzelne Familien den Rang von Herrscherdynastien innehatten. Die Paläste waren multifunktionale Anlagen

aus Wohnräumen, Speichern und Magazinen, Werkstätten, Verwaltungsarchiven und Kultbauten. Besonders aufschlussreich ist der mit dem homerischen Terminus »Megaron« bezeichnete Gebäudetypus im Zentrum einer solchen Festung: Auf eine Vorhalle mit zwei Säulen folgte üblicherweise ein kleiner Vorraum und darauf der Thronsaal. In dessen Mitte befand sich eine große, von Säulen umstandene Feuerstelle, die wohl zeremonielle Funktion hatte. Der steinerne Thron selbst stand an einer Seitenwand, auf der gemalte Schutzgottheiten den Herrscher flankierten und schützten.

Ein Bankett zu Ehren der Götter

In der Burg von Pylos (siehe Karte oben links) wurden in den Räumen rund um den Thronsaal Tausende von Trinkgefäßen ausgegraben. Zudem zeigt ein Fresko einen Sänger mit Lyra, dazu Männer, die sich einander gegenüberstehend zu prosteten. Dass solche Bankette nicht nur Gemeinschaft er-



Im 17. Jahrhundert v. Chr. bildete sich in Griechenland die nach der Stadt Mykene bezeichnete Kultur aus. Mitte des 15. Jahrhunderts, in der späten Bronzezeit, entstanden wichtige Burgen, die ebenso wie monumentale Grabhügel von der Macht ihrer Besitzer kündeten. Hethiter, Ägypter und Assyrer sahen den mykenischen Raum vermutlich als ein zusammenhängendes Königreich an – mangels genauerer Informationen?

zeugten, sondern auch kultischen Charakter hatten, belegt eine andere Darstellung im Vorraum des Megarons: Eine Prozession begleitet einen überdimensional großen Stier.

In einer fragmentarisch erhaltenen Wandmalerei des Thronraums liegt das Tier dann auf einem Opferaltar. Eine übergroße Männergestalt, welche die Kultprozession anführt, fällt hier auf. War sie ein Gelehrter, ein Priester oder gar der König selbst? Niemand vermag dies zu sagen, denn es gibt in der mykenischen Kunst nichts Vergleichbares. Anders als die zeitgenössischen Kulturen des Vorderen Orients und Ägyptens hinterließen die Mykener nämlich weder Königsstatuen noch Reliefs oder Wandmalereien, welche die Taten ihrer Regenten verherrlichten. Zwar existieren einige wenige Bildnisse thronender Personen, doch handelt es sich dabei um Göttinnen. Es sind allerdings auch Bilder erhalten, in denen Männer vor solchen Göttinnen stehen und Stäbe in der Hand halten. Das könnten Zepter sein, denn solche Würdezeichen fanden sich in frühmykenischen Schachtgräbern.

Auch schrieb Homer von einem Zepter, das Agamemnons Vorfahren von Zeus selbst erhalten hätten und auf dem die Macht des Königs von Mykene beruhen sollte; der Reiseschriftsteller Pausanias wollte es als Kultobjekt in Chaironeia gesehen haben.

Warum also überhaupt an der monarchischen Regierungsform zweifeln? Das scheinbar so klare Bild wird durch den Nachweis zweiter, kleinerer Thronsäle in Mykene, Pylos und Tiryns getrübt. Diente der ebenfalls dem König, dann aber zu anderen Anlässen? Oder residierte dort eine Königin, ein Stellvertreter des Herrschers oder ein sonstiger hoher Beamter?

Die Beziehung der einzelnen Paläste zueinander ist ebenfalls vielfach unklar. Besonders drei Anlagen in der antiken Landschaft Argolis geben Rätsel auf. Zwar verfügten die darin gelegenen Festungen Mykene, Tiryns und Midea über Megara und Archive für Verwaltungstexte, doch liegen sie viel zu nahe beieinander, als dass alle drei Zentralorte autonomer



Staaten gewesen sein könnten. Vielmehr gehen viele Forscher inzwischen davon aus, dass die letzten beiden Mykene untergeordnet waren und das während der Bronzezeit an der Küste gelegene Tiryns als »Hafenpalast« fungierte.

Verwaltungstexte, in einer frühen Form des Griechischen verfasst und in der so genannten Linear-B-Schrift notiert, sind als Quellen außerordentlich wichtig. Zwar handelt es sich in der Regel nur um stichwortartige Texte, Bestandsaufnahmen, Listen von Ablieferungen und Zuweisungen von Personen, Tieren und Waren, ferner von Außenständen und Fehlbeträgen. Überdies betreffen die Aufzeichnungen jeweils nur ein einziges Verwaltungsjahr. Die Dokumente gewähren aber dennoch Einblicke in einzelne Bereiche der Palastwirtschaft bis hin zu Kult und Religion. Sie ermöglichen auch Rückschlüsse auf die politischen und administrativen Strukturen – etwa durch die Nennung von Titeln und Funktionen sowie durch die Registrierung von Besitzverhältnissen und Zuständigkeiten.

Beispielsweise ist darin von einem »wanax« die Rede, dem der französische Altertumswissenschaftler Pierre Carrier (1949–2011) bereits 1984 eine noch immer maßgebliche Studie gewidmet hat. Dieser Terminus entspricht linguistisch

Vier tonnenschwere Monolithen bilden den seiner Reliefs wegen »Löwentor« genannten Hauptzugang von Mykene. Aussparungen im Stein deuten darauf hin, dass er mit einem zweiflügeligen und mit Bronzebeschlägen verstärkten Tor verschlossen wurde. Von dort aus führte eine Straße direkt zum Zentralbau.

tisch dem griechischen »anax«: »Herr«. So wurden im archaischen und klassischen Griechenland in der Regel die Götter angesprochen, Homer verwendete den Begriff aber auch als Königstitel. So bezeichnete er Agamemnon als »anax andron«, als »Herr der Männer«. Linguisten zufolge entstammt dieses Wort keiner indogermanischen Sprache. Es könnte minoischen Ursprungs sein und wäre dann vielleicht samt Königtum und dem Konzept eines Palastes importiert worden – vor 1450 v. Chr. übte Kreta großen Einfluss auf das Festland aus. Allerdings hilft diese Querverbindung kaum weiter, denn auch die minoische Regierungsform gibt Rätsel auf.

Informationen aus der Peripherie

Während der »anax« in Griechenland selbst bald nur noch in Personennamen wie Hipponax oder Anaximenes Verwendung fand, blieb »wanax« als Titel in zwei Randkulturen der antiken Welt erhalten. Eine Grabinschrift des 6. Jahrhunderts v. Chr. nannte einen phrygischen König »vanaktei«, was mit »Herr« übersetzt wird. Philologen sind sich einig, dass der Begriff mit »wanax« verwandt ist, sei es über eine gemeinsame Wurzel, sei es, dass der phrygische Begriff aus dem mykenischen abgeleitet sei. Die betreffende Inschrift nennt auch einen »lavagtaei«, der vermutlich dem mykenischen »lawa-getas« entspricht, dem laut Linear-B-Texten ranghöchsten mykenischen Beamten nach dem »wanax«; dieser Titel ist als »Heerführer« zu übersetzen.

Die zweite sprachliche Parallele führt auf die Insel Zypern. Dort wurden die Söhne und Brüder des Königs als »anaktes« (Plural von »anax«) bezeichnet, während seine Schwestern und Frauen »anassai« waren. Letzteres dürfte dem Titel »wanassa« in einigen Linear-B-Texten gleichkommen, der im Umkehrschluss also die mykenische Königin bezeichnete. Ein drittes bemerkenswertes Beispiel für das Fortleben spätbronzezeitlicher Titel liefert eine Inschrift des 6. Jahrhunderts v. Chr. aus der griechischen Stadt Geronthrai. Darin werden Jahre, in denen es keinen amtierenden Priester gab, »awanax« genannt – »wanaxlose« Jahre.

Auf vielen Tontafeln und Gefäßen der Paläste von Chania, Knossos, Pylos, Theben und Tiryns steht »wanax« zu lesen. Dass er andernorts fehlt, liegt nach Expertenmeinung nur an der insgesamt geringen Zahl von Texten. In keinem einzigen Fall wurde auch der Name des Amtsinhabers notiert – man wusste einfach, wer gemeint war, da es in jedem Stadtstaat nur einen Titelträger gab. Durch detektivische Kombination verschiedener Texte gelang es dem britischen Mykene-Experten John Chadwick (1920–1998) immerhin, einen König von Pylos mit hoher Wahrscheinlichkeit zu benennen: Enkhellawon, zu Deutsch: »der sich am Speer erfreut«.

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de



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



[www.spektrum.de/t/
hochkulturen-der-menschheit](http://www.spektrum.de/t/hochkulturen-der-menschheit)

Nach Aussage der Dokumente verfügte der »wanax« ebenso wie der »lawagetas« und als »telestai« bezeichnete Funktionäre über einen besonderen Grundbesitz, den »temenos«, wobei der des mutmaßlichen Königs dreimal so groß war wie der aller anderen. Zudem waren ihm wesentliche Teile der Palastwirtschaft direkt unterstellt; andere allerdings ausschließlich dem »lawagetas«. Das gleiche Phänomen zeigt sich auch bei den Abgaben für ein Fest zu Ehren des Gottes Poseidon: Der »wanax« musste nicht als Einziger unter den Amtsträgern seinen Beitrag leisten, er stimmte lediglich den Löwenanteil. Er erscheint in diesem Licht weniger als ein Alleinherrscher, sondern eher als herausragender Vertreter einer Elite, als »primus inter pares«, was die Vorstellung einer Oligarchie statt der Monarchie unterstützen würde.

Immerhin war es laut einer ungewöhnlich ausführlichen Linear-B-Tafel allein ihm vorbehalten, die als »damokoros« bezeichneten Beamten zu ernennen. Diese gehörten einer mittleren Führungsschicht an, deren Aufgabe wohl die Kommunikation zwischen den als »basileis« bezeichneten Vorstehern der verschiedenen Gemeinden, den »koreteres« genannten Bezirksvorstehern und dem »wanax« beinhaltete. Dass der Titel »basileus« später zur Standardbezeichnung für einen König wurde, mag genau in diesem Organigramm begründet sein: Nach dem Untergang der mykenischen Paläste mit ihrer Administration um 1200 v. Chr. avancierten diese lokalen Anführer zur Spitze der Gesellschaft.

Großkönige und Hohepriester

Ob der »wanax« auch Oberbefehlshaber sowie Gesetzgeber und oberster Richter war, wie es Herrschern in zeitgleichen Nachbarkulturen zukam, lässt sich anhand der Texte nicht klären. Dass »lawagetas« mit »Führer des (Kriegs-)Volks« übersetzt werden kann, lässt aber vermuten, dass diesem Beamtent die Führung in militärischen Fragen oblag.

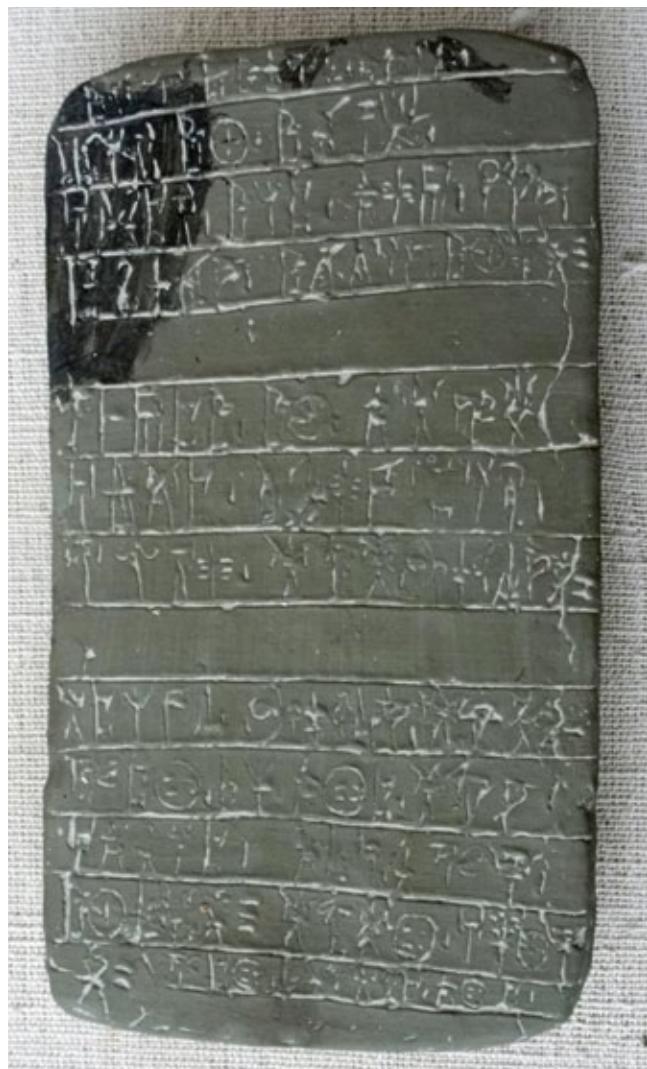
Der Prähistoriker Thomas Palaima von der University of Texas in Austin analysierte die Linear-B-Fragmente hinsichtlich der sakralen Funktionen des »wanax«. Er sei wohl Hohepriester des Staatskults gewesen. Dafür spreche auch die Darstellung von Greifen, die den Thron in Pylos wie in Knossos flankieren und den Schutz höherer Mächte symbolisieren. Eine Rinne neben ersterem deuten Experten als Vorrichtung für Trankopfer. Damit kam dem »wanax« eine Mittlerrolle zu Göttern oder Ahnen zu, ähnlich dem ägyptischen Pharao. Dass er wie dieser aber selbst religiöse Verehrung genoss, gilt als unwahrscheinlich. Immerhin führen ihn einige Schriften als Empfänger von Ölspenden in einem Atemzug mit Gottheiten auf, was die Vorstellung einer kultischen Verehrung des Königs, seiner Familie oder auch seiner Ahnen stützen würde.

In Linear B beschriebene Tafeln entstammen den Archiven der Palastverwaltungen. Sie sind bei der Aufklärung der politischen und wirtschaftlichen Strukturen der mykenischen Staaten eine der wichtigsten Quellen (hier ein Text aus Pylos, der das Installieren einer Wache an der Küste behandelt).

Rein sprachlich wäre es sogar möglich, dass sich der Terminus »wanax« nicht immer auf den weltlichen Herrscher, sondern mitunter wirklich auf einen Gott bezog. Daher röhrt auch die vor wenigen Jahren vorgebrachte radikale Interpretation des deutschen Althistorikers Tassilo Schmitt, der ein mykenisches Königtum insgesamt anzweifelt und alle entsprechenden Nennungen als Ansprache einer Gottheit deuten will. Allerdings stehen die meisten eindeutig in Verwaltungstexten, die keinen religiösen Bezug hatten.

Forscher wie Birgitta Eder von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und Jorrit Kelder von der Universität von Amsterdam bringen neuerdings sogar eine eigentlich längst begrabene These wieder ins Spiel: Die mykenischen Stadtstaaten seien nicht unabhängig gewesen, sondern hätten unter der Herrschaft eines einzigen Großkönigs gestanden. Das folgern sie aus der erstaunlichen Einheitlichkeit dieser Kultur, die eine gewisse Standardisierung durch eine zentrale Ordnungsmacht nahelegt, sowie aus den Überlieferungen der Hochkulturen im Vorderen Orient und in Ägypten.

Dass man in regem Austausch stand, belegen Funde mykenischer Produkte in diesen Ländern und entsprechende





Im Thronsaal des mykenischen Palastes in Knossos (Kreta) schützten Greife den Thron des Herrschers – mythische Wesen, halb Adler, halb Löwe (im Bild: rekonstruierte Wandfresken).

Importwaren im mykenischen Raum. Kunsthistoriker können auch Elemente vorderasiatischer Ikonografie in der mykenischen Kunst nachweisen. Eine weitere wichtige Quellen-gattung sind bildliche Darstellungen in Ägypten und Vorder-asien, etwa Malereien in thebanischen Beamtengräbern der 18. Dynastie, die Minoer und Mykener als Gabenbringer abilden.

Mehr noch: Ägypten und das Reich der Hethiter hinterließen einen Schriftwechsel, der auch Griechenland mehrfach erwähnte. Laut den Annalen des Pharaos Thutmosis III. (1479–1425 v. Chr.) seien Gesandte aus dem Land Tanaja gekommen, um die üblichen Geschenke, darunter ein Silbergefäß in kretischem Stil, zu überreichen und diplomatische Beziehungen zu etablieren. Dass es sich dabei um das griechische Festland und damit um die mykenischen Staaten handelte, verdeutlicht ein Text aus der Zeit des Pharaos Amenophis IV. (1392–1355/54 v. Chr.): Ein Statuenpfeiler in dessen Totentempel im heutigen Kom el-Hetan (Theben-West) listet die Länder Kaftu und Tanaja auf, dazu einige ihrer Orte. Etliche dieser Namen wurden inzwischen identifiziert, darunter Knossos und Phaistos in Kaftu, das demnach der Insel Kreta entsprach, sowie Mykene und andere in Tanaja, das folglich mit dem mykenischen Festland gleichzusetzen ist.

Ob die Ägypter damit auch zwei verschiedene Staaten gebilde meinten, lässt sich nicht sagen. Gute Kenntnisse über die politischen Verhältnisse der jeweils anderen Seite waren für die Aufnahme von Handelsbeziehungen nicht unbedingt erforderlich. Wenn also die Annalen des Thutmosis von diplomatischen Beziehungen mit einem Fürsten von Tanaja berichteten, so schließt das keineswegs aus, dass in diesem Land noch weitere regierten.

Auf etwa 25 Keilschrifturkunden des 14. und 13. Jahrhunderts v. Chr. aus der hethitischen Hauptstadt Hattuscha (heute: Bogazkale) ist von einem Reich namens Ahhijawa die Rede. Die lautliche Ähnlichkeit zur Bezeichnung Homers für

die Griechen »Achäier« ließ Forscher hellhörig werden. Der hethitische Großkönig behandelte den König Ahhijawas als Gleichrangigen, was etwa seine Ansprache als »mein Bruder« verdeutlicht – eine diplomatische Formel, wie sie auch im Schriftverkehr mit dem ägyptischen Pharao gebräuchlich war. Als Einflussgebiet Ahhijawas nennen die Texte unter anderem die Stadt Millawanda, die heute mit Milet identifiziert wird und, wie Archäologen inzwischen belegt haben, zu jener Zeit eine mykenische Siedlung war. Zwei Namensnennungen – ein König und der Bruder eines anderen Königs – verorten ebenfalls den Ansprechpartner Hattuschas in der griechischen Kultur: Die hethitischen Schreibweisen legen eine Gleichsetzung mit den Namen Atreus und Eteokles nahe. Wo Ahhijawa allerdings genau zu lokalisieren ist, darüber verraten die Keilschrifttexte wenig, außer dass ein Meer zu überqueren war. Dass es in der Ägäis lag, darüber sind sich die Forscher mittlerweile einig. Einige vermuten den Palast von Mykene als Herrschersitz, andere den im boiotischen Theben.

Somit stärken diese Briefe die Annahme, dass eine Monarchie die mykenische Palastzeit geprägt hat. Zwar legen sie zudem die Vermutung nahe, dass da zwei Gleichrangige miteinander korrespondierten, was zur These eines gesamt-mykenischen Großreichs passen würde. Doch hier ist Vorsicht geboten! Auch die Hethiter waren sicher nur unzureichend über die wahren Verhältnisse im fernen Griechenland im Bild.

Eine Kultur, viele Reiche

Letztlich widersprechen die bislang bekannten Linear-B-Texte dieser These eher, denn kein einziger befasst sich mit Belangen, die über den jeweiligen Palast und sein Umland hinausgingen. Vermutlich war das mykenische Griechenland also tatsächlich in mehrere, miteinander in engem Kontakt stehende, politisch aber unabhängige Staaten gegliedert, an deren Spitze jeweils ein als »wanax« bezeichneter Herrscher stand. In seinen Aufgaben und Befugnissen glich er wohl in vielerlei Hinsicht den Königen anderer bronzezeitlichen Reiche. Viele wichtige Details, etwa die Modalitäten der Amtsnachfolge, bleiben freilich noch zu klären. Herrschte im mykenischen Kulturraum eine Wahlmonarchie, bei der eine Oberschicht einen aus ihrer Mitte zum Alleinherrcher kürt? Oder gab es Dynastien mit geregelter Erbfolge? Die früh-griechische Geschichte erweist sich auch weiterhin als ergiebiges Arbeitsfeld, in dem neue Funde und innovative For-schungsansätze spannende Erkenntnisse versprechen. ≈

DER AUTOR



Josef Fischer ist Althistoriker und lehrt an der Universität Salzburg. Die griechische Frühgeschichte zählt zu den Schwerpunkten seiner Forschung.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1343328

MYKENE (II)

Auf den Spuren Homers

Lange galten das antike Lakonien und seine Hauptstadt Sparta Mykene-Experten als wenig interessant. Doch in den letzten Jahren mehren sich Hinweise darauf, dass auch dort ein Palast stand: so wie es Homer beschrieben hat.

Von Waltraud Sperlich



Das »Menelaion« wurde wohl im 8. Jahrhundert v. Chr. zum Andenken an den mythischen König Menelaos und seine Frau Helena an einem Ort errichtet, an dem die Spartaner noch Ruinen aus mykenischer Zeit vorfanden.

>> **E**ine Burg, die gleich dem Strahl der Sonne und dem Schimmer der Mondes« leuchtete, so beschrieb der griechische Dichter Homer in seiner »Odyssee« die Residenz des Menelaos. Er schildert den Herrscher von Lakonien als einen der reichsten Männer der Welt, der es sich leisten konnte, die berühmte Schönheit Helena zur Frau zu nehmen. Das Weitere ist bekannt: Der trojanische Prinz Paris entführte die Gattin samt Schatz und löste damit einen mörderischen Krieg aus.

Mag auch die Tauglichkeit der homerischen Epen als historische Quelle umstritten sein, herrscht unter Experten doch Einigkeit darüber, dass ihre Hexameter die Verhältnisse der mykenischen Zeit reflektieren, also der späten Bronzezeit Griechenlands (17.–11. Jahrhundert v. Chr.). Achilles, Agamemnon und Menelaos herrschten demnach in rustikalen Palästen, deren Mauern aus so mächtigen Blöcken errichtet wurden, dass nur Zyklopen sie hochgewuchtet haben konnten, wie die Autoren der klassischen Antike befanden. Und so sehr sie die mythischen Helden auch verehren mochten, hinderte es sie nicht daran, in den noch sichtbaren Burgruinen und Hügelgräbern nach Schätzen zu suchen.

Sparta, wie Homer wohl im 8. oder 7. Jahrhundert v. Chr. die Hauptstadt Lakoniens nannte, wäre hier eine erste Adresse gewesen, doch Thukydides, der Chronist des Peloponnesischen Kriegs (431–404 v. Chr.), beschrieb es als einfaches Militärlager; Zyklopenmauern erwähnte er nicht.

Heinrich Schliemann, der mit Homers Epen im Gepäck Mykene sowie Troja entdeckte, machte sich 1888 daran, den Palast des Menelaos zu finden. Aber schon nach wenigen Tagen gab er auf und erklärte, entsprechende prähistorische Zeugnisse gäbe es rund um Sparta nicht. Wenige Monate später stieß der griechische Archäologe Christos Tsountas allerdings acht Kilometer südlicher bei Vapheio (siehe Karte S. 46) auf Kuppelgräber, wie sie in der mykenischen Kultur ab dem 16. Jahrhundert v. Chr. verbreitet waren. Obendrein bargen zwei davon wertvolle Halsketten, Ringe aus Edelsteinen und kunstvolle Goldtassen.

Auch im 25 Kilometer von Sparta entfernten Pellana kamen 1926 zwei Kuppelgräber zum Vorschein. Doch Palast-

bauten im menelaischen Dunstkreis fehlen, weshalb der britische Althistoriker Paul Cartledge 1979 konstatierte: »Hätte ein Pylos auch in Lakonien existiert, wäre es längst entdeckt worden.« Das warf freilich die Frage auf: Wo hatten jene Menschen gewohnt, die sich so fürstlich bestatten ließen?

Wiederentdeckte Entdeckung

Ausgerechnet die derzeitige Krise Griechenlands eröffnete neue Perspektiven. Denn dem Sparkurs fielen früh die Antikenverwaltungen des Landes zum Opfer, darunter 2010 die von Sparta. Das verschaffte der entlassenen Amtsleiterin Adamantia Vasilogamvrou mehr Zeit, die Geschichte mit dem Spaten statt vom Schreibtisch aus zu erforschen.

Sie war nicht die Erste, die das Votum Schliemanns und seiner Nachfolger nicht abschreckte. Bereits ab 1936 durchstreifte die britische Archäologin Helen Waterhouse Lakonien. Bei systematischen Begehungen las sie alle Artefakte auf, die Pflug oder Erosion ans Tageslicht gebracht hatten, und dokumentierte sie penibel. Vasilogamvrou hat diese Aufzeichnungen noch zu ihrer Amtszeit studiert und wurde so auf das Kirchlein Agios Vasileios aufmerksam, das auf einer Anhöhe zwölf Kilometer südlich von Sparta liegt. Waterhouse waren dort ungewöhnlich viele Kylix-Scherben aufgefallen, also Überreste der typisch mykenischen Weinpokale mit oft hohem Fuß und zwei Henkeln. Die Griechin überlegte, ob dies ein Hinweis auf jene Trinkgelage sei, von denen Homer mehrfach berichtete – und damit auch die Spur eines mykenischen Palastes.

Unterhalb des Kirchleins stieß sie in einem Olivenhain 2009 selbst auf eine Tonscherbe. Verborgen in modernem Hausmüll lag diese in einer von Sturzbächen ausgewaschenen Rinne. Die Forscherin hatte darauf gebaut, dass die Winterregen Kylix-Fragmente von dem eigentlichen Fundplatz oberhalb herunterspülten. Fast hätte sie bei dieser Voruntersuchung des Geländes das Stück Keramik übersehen, denn es war eben und aus grobem Ton gefertigt, stammte demnach sicher nicht von einem Trinkgefäß.

Sechs Zentimeter lang und etwa drei Zentimeter breit, erwies sich der Fund dennoch als wegweisend. Die Scherbe trägt Striche, daneben Kreise – beides sind Zeichen der mykenischen Linear-B-Schrift. »E-pi-zo-ta« steht dort mit Erstern notiert, die Bezeichnung für ein kurzes Schwert oder einen Dolch. Es waren aber die Kreise, die Vasilogamvrou elektrisierten, denn so hatten die Mykener die Zahl 100 geschrieben. Das Täfelchen trug fünf Kreise; war es also eine Inventarliste über 500 Schwerter? Könnte es ein Hinweis auf eine große Waffenschmiede sein? Die hätte sich natürlich in einem Palast befinden, wie derartige Linear-B-Tafeln auch nur in den Verwaltungszentren der Paläste archiviert worden waren.

Als die Archäologin 2010 ihre feste Anstellung verlor, begann sie umgehend mit den Ausgrabungen auf dem Hügel rund um die Kirche. Sie entdeckte zunächst Nekropolen aus dem 16. Jahrhundert v. Chr., dann Grundmauern aus Bruchstein, die zu einem stattlichen Gebäude der späten Bronzezeit (1400–1200 v. Chr.) gehörten, der Hochzeit der myke-

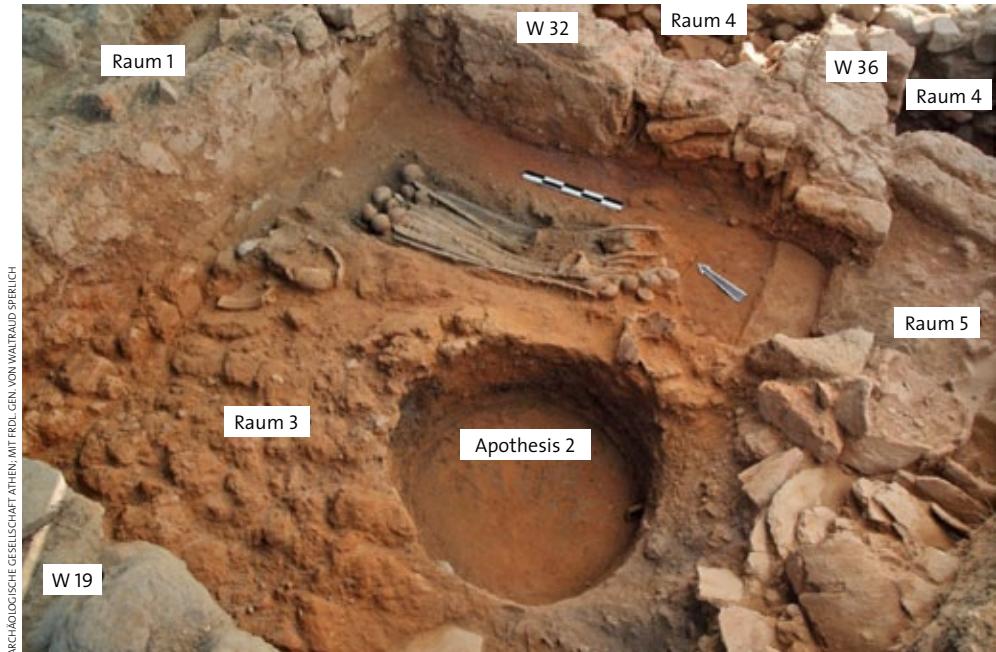
AUF EINEN BLICK

UND HOMER HATTE DOCH RECHT

1 »Ilias« und »Odyssee« bewahren nach Expertenmeinung Erinnerungen an die mykenische Kultur und die gesellschaftlichen Bedingungen der späten Bronzezeit Griechenlands.

2 Während Archäologen einige von Homer als Residenz von Fürsten und Königen aufgeführten Orte identifizieren konnten, fehlte bislang ein solcher Nachweis für **Lakonien mit seinem Zentrum Sparta**.

3 Griechische Archäologen haben nun einen Ort bei Sparta ausgemacht, an dem vielleicht doch ein mykenischer Palast stand. Die wichtigsten Indizien: **Tonscherben mit Linear-B-Schrift**, wie sie Palastverwaltungen bei der Archivierung von Warenbeständen nutzten.



ARCHÄOLOGISCHE GESELLSCHAFT ATHEN, MIT FOTOGEN VON WALTRAUD SPERLICH

Sorgsam gelagerte Bronzeschwerter deuten darauf hin, dass »Raum 3« des Gebäudes »Alpha« ein Waffenmagazin gewesen ist – und damit das Gebäude selbst ein Kandidat für das Megaron des Palastes.

nischen Palastkultur. Alpha, wie sie es nennt, verfügte über mindestens acht Räume mit Trennwänden aus ursprünglich luftgetrockneten Lehmziegeln, die eine Feuersbrunst zu Backstein brannte. Im Raum 3 kamen dann 17 Bronzeschwerter zu Tage, aufeinandergestapelt, also wohl ursprünglich in einer Holzkiste gelagert (siehe den Pfeil im Foto). Zwei weitere Räume bargen Gegenstände für Kult und Feste.

Im Boden verborgen

Messungen des elektrischen Bodenwiderstands offenbarten weitere, noch verborgene Baustrukturen sowie die Gesamt-abmessung: Was immer dort aus mykenischer Zeit stammt, es nahm eine Fläche von 26 000 Quadratmetern ein. Zum Vergleich: Der Palast des mykenischen Knossos war mit 21 000 Quadratmetern erheblich kleiner. Für eine Residenz sprechen auch die Ausmaße weiterer Gebäude und nicht zuletzt die Größe des Innenhofs, der fast 70 Meter lang und einst mit Säulen geschmückt war.

Hinzu kam vermutlich eine luxuriöse Innenausstattung. Fast alle Räume trugen Fresken an den Wänden – von denen nur Fragmente geblieben sind. In akribischer Kleinarbeit sichtete die Griechin sie, inzwischen von Mitarbeitern unterstützt, und identifizierte als Motive bereits Natur- und Menschenendarstellungen sowie Kampfszenen, wie man sie aus Mykene, Knossos und Pylos kennt.

Noch harrt das Palastarchiv der Entdeckung, aber vier weitere tönerne Schriftstücke wurden geborgen. Zwei sind Fragmente von Inventarlisten oder Lieferscheinen über Stoffe aus Leinen und Wolle. Die Mykener waren für ihre Textilproduktion weithin bekannt. Ein Exportschlager waren auch parfümierte Öle, die in Flakons verpackt und mit einem tönernen Etikett versehen wurden, woraufhin sie in den ganzen östlichen Mittelmeerraum verschifft wurden. Ein solches Etikett tauchte ebenfalls auf.

Eines der Linear-B-Täfelchen verweist auf Homer, denn es trägt einen Namen, den er in seinen Werken »Ilias« und »Odyssee« erwähnt. »Ti-jo-ko« ist auf dem Fragment zu lesen. Der Anfang ist zwar weggebrochen, aber das Zeichen für A lässt sich erahnen: Antiochos. Laut Homer war ein Mann dieses Namens einer der Feldherren im Krieg; auch einer der Freier, die um die Hand der Penelope warben, hieß so.

Nach gerade einmal vier Jahren Grabung zeichnet sich ab, dass die Vorstellungen der Archäologen von Lakonien überdacht werden müssen. Dass bislang keine Zyklopenmauern zu Tage kamen, ist nicht von Bedeutung. Entweder hat man sie noch nicht entdeckt, oder es hat diese massiven Bauten nicht gegeben. Das aber war in Pylos auch so. Aufschlussreicher wird es sein zu klären, ob das Gebäude Alpha als Megaron anzusprechen ist, wie es Vasilogamvrou auf Grund seiner Größe und des säulenbestandenen Innenhofs vermutet. In diesem für mykenische Residenzen charakteristischen Zentralbau (siehe den vorigen Artikel) befand sich der Thronsaal mit einer Feuerstelle, die kultischen Zwecken diente. Sie ist für Archäologen auch nach Jahrtausenden noch an der Steineinfassung erkennbar. Bleibt zu hoffen, dass die derzeitige Wirtschaftskrise die Suche nach diesem Indiz nicht unnötig erschwert. ~

DIE AUTORIN



Die Archäologin **Waltraud Sperlich** arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Griechenland.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1343329

Hinrichtung mit Überraschung

Eine Behauptung wird dadurch wahr, dass sie einen inneren Widerspruch enthält.

An diesem Paradox beißen sich seit 70 Jahren die Logiker die Zähne aus.

VON CHRISTOPH PÖPPE

In diesen Monaten wäre Martin Gardner 100 Jahre alt geworden. Der legende Autor der »Mathematical Games« im »Scientific American« (die als »Mathematische Spielereien« in der Frühzeit dieser Zeitschrift erschienen) hat der Nachwelt unter vielen unterhaltsamen Texten auch etliche Kopfnüsse hinterlassen. Eine der härtesten unter ihnen ist das »Paradox der unerwarteten Hinrichtung«. In seinem Artikel vom März 1963 bezieht sich Gardner auf eine Arbeit des Philosophen Michael Scriven von 1951; aber allem Anschein nach wurde die Idee bereits in den 1940er Jahren diskutiert, und niemand weiß mehr, wer sie zuerst aufbrachte.

In ihrer üblichen Form geht die Geschichte so: Ein Mann wird zum Tode durch Erhängen verurteilt. Der Richter, von dem bekannt ist, dass er stets sein Wort hält, kündigt an, dass das Urteil an einem Tag der nächsten Woche vollstreckt wird. Er gibt aber den genauen Tag nicht an. Vielmehr verkündet er als zusätzliche Strafverschärfung: »Die Vollstreckung wird für dich eine Überraschung sein. Du wirst nicht wissen, welcher Tag es ist, bis es dir am Morgen dieses Tages verkündet wird.«

Da seit der Erstveröffentlichung die Fünftagewoche eingeführt wurde, kommen heute als Hinrichtungstage nur Montag, Dienstag, Mittwoch, Donnerstag und Freitag in Frage. Aufgeknüpft wird nach amerikanischem Brauch stets um 12 Uhr mittags (»High Noon«).

Nach dem ersten Schock weiß der Anwalt des Verurteilten Trost für seinen Mandanten: »Der Richter kann dich am Freitag nicht zum Galgen schicken. Denn wenn du den Donnerstag überlebst, weißt du ja schon, dass es der

Freitag sein muss. Also hätte der Richter in diesem Fall seinen Urteilsspruch nicht eingehalten. Damit fällt der Freitag als Hinrichtungstermin aus.«

Also bleiben nur noch Montag, Dienstag, Mittwoch und Donnerstag übrig. Aber für den Donnerstag gilt dieselbe Argumentation wie oben für den Freitag: Wenn der Mann am Donnerstagmorgen noch lebt, weiß er, dass es ihm heute an den Kragen geht, weil der Freitag ja schon ausgeschlossen war. Also fällt der Donnerstag aus ...

Mathematisch formuliert: Wir können einen Induktionsbeweis führen. Aus der Menge der denkbaren Hinrichtungstage ist der jeweils letzte Tag zu streichen. Da die Menge der möglichen Hinrichtungstage endlich ist, bleibt nach endlich vielen Denkschritten nur die leere Menge übrig. »Also kann ich gar nicht hingerichtet werden«, denkt sich der Verurteilte und freut sich seines Lebens – und vor allem der Tatsache, dass er den Richter bei einem Logikfehler ertappt hat.

Ein sich selbst aufhebender Logikfehler

Am Donnerstag kommt der Henker. Überraschung!

Im Nachhinein hat der Richter Recht behalten. Der Verurteilte wurde im angesagten Zeitraum aufgehängt, und am Morgen des Hinrichtungstages wusste er noch nicht, dass dies sein letzter Tag sein würde. Damit ist die ganze schöne Schlusskette zusammengebrochen. Aber wo liegt der Denkfehler?

Das Paradox hat schon damals zahlreiche Veröffentlichungen ausgelöst, vor allem in philosophischen Zeitschriften; und der Strom reißt bis heute nicht ab. Zahlreiche Autoren treten auf mit dem Anspruch, nun endlich die Lö-

sung des hartnäckigen Rätsels anzubieten – nur um wenige Jahre später von einem anderen Autor mit ebenso überzeugenden Argumenten widerlegt zu werden. Mathematische Logiker übersetzen die Aussagen des Problems in ihre formale Sprache, in der Hoffnung, mit den etablierten Schlussregeln ihres Fachs das Paradox auflösen oder zumindest einen Widerspruch dingfest machen zu können. Dabei entdecken sie, dass sie für die umgangssprachliche Formulierung »Du weißt, dass ...« beziehungsweise »Du wirst nicht wissen, dass ...« keinen Formalismus vorrätig haben, ersinnen ein Symbol und zugehörige Schlussregeln dafür – und streiten sich darüber, welche dieser Regeln zulässig sind.

Versuchen wir zunächst, die – wenigen – unstrittigen Dinge festzuhalten.

Erstens: Damit das Paradox seine Wirkung entfaltet, muss niemand sterben. Es ändert nichts Wesentliches, wenn derjenige, auf dessen Wissen es ankommt, nach dem Ereignis, auf das es ankommt, noch denken kann.

Eine frühe Form der Geschichte ist auch weit weniger makaber: Der Lehrer kündigt für die nächste Woche einen Test an, aber der genaue Termin soll eine Überraschung sein (»surprise exam«). In einer noch früheren Variante waren es ein Offizier und eine unangekündigte militärische Übung.

Wem selbst dieser Kontext noch zu viele unangenehme Gefühle weckt, der könnte sich mit der Schokoladenversion anfreunden. Max zeigt Moritz eine Reihe von Bechern und sagt: »Du darfst diese Becher einen nach dem anderen anheben. Unter genau einem ist ein Überraschungsei. Und du wirst nicht wissen, unter welchem, bis du genau diesen Becher anhebst.«

Zweitens: Es kommt nicht darauf an, wie viele Tage zur Auswahl stehen. Selbst wenn es nur zwei sind, kommt das Paradox zu voller Blüte – und man muss nicht so lange Gedankenketten bewältigen.

Drittens: Die Formulierung »Du wirst nicht wissen, dass ...« ist zu verstehen als »Du kannst aus der vorliegenden Information nicht logisch erschließen, dass ...«. Allerdings kann man sich immer noch darüber streiten, worin genau die vorliegende Information besteht. Die beiden Aussagen des Richters gehören sicher dazu; am Donnerstag kann der Verurteilte auch auf die Tatsache zurückgreifen, dass das Ereignis bisher nicht stattgefunden hat – wenn er dann noch lebt. Da sich aber die beiden Aussagen des Richters widersprechen können – nämlich am Freitag –, stellt sich die Frage nach ihrer Glaubwürdigkeit. Ist der Richter bereit, alles zu tun, um seine eigene Prognose zu erfüllen? Und wie würde er das gegebenenfalls anstellen?

Viertens: Es gibt das Problem in einer weichen und einer harten Version. In der weichen ist es zumindest denkbar, dass entgegen der Ansage das Ereignis – Hinrichtung, Test, Überraschungsei – überhaupt nicht stattfindet. Also ist es logisch nicht von vornherein abwegig, der Ansage zu misstrauen. Merkwürdigerweise wäre das für den Verurteilten eine schlechte Nachricht. Denn wenn der Richter vielleicht insgeheim bereit ist, die Hinrichtung gänzlich ausfallen zu lassen, also seine erste Ansage Lügen zu strafen, dann taugt seine zweite Ansage nicht mehr dazu, den Freitag als Hinrichtungstag zu widerlegen. Denn wenn der Verurteilte am Freitag früh noch lebt, kann er nicht wissen, dass er am Freitag hingerichtet wird, also wäre eine Hinrichtung am Freitag für ihn eine Überraschung, also fällt der Freitag als Hinrichtungstag nicht aus ...

Aber damit ist dem Paradox die Spitze abgebrochen. Richtig paradox ist nur die harte Version, in der es keinen Zweifel daran gibt, dass das Ereignis stattfinden wird. Man denke sich einen Notar – zu definieren als Quelle unbezweifelbarer Wahrheit –, der dem Verurteilten bestätigt, dass das Datum der Hinrichtung bereits festgelegt ist und in der kommenden Woche liegt. Oder Max legt vor Moritzens Augen das Ei unter einen der Becher und veranstaltet mit diesen eine Art Hütchenspiel, so dass Moritz sicher sein kann, dass das Ei unter einem der Becher ist, aber keine Ahnung hat, unter welchem.

Logik für Stoiker

Einige mathematische Logiker haben das Paradox auf eine sehr spezielle Weise auszuhebeln versucht; das ist die Lösung, die Ian Stewart in dieser Zeitschrift (3/2001, S. 112) angeboten hat. Man akzeptiert die Schlusskette, die der Reihe nach Freitag, Donnerstag, Mittwoch, ... ausschließt, bis zu dem Punkt, an dem es um den ersten Tag der Woche geht. Den kann man nicht mehr ausschließen, weil man sonst in Wider-



spruch zum ersten Teil der Ansage griezt. Also sagt man den Test für Montag voraus; wenn er an diesem Tag ausbleibt, für Dienstag, und so weiter. Wenn er, sagen wir, am Donnerstag tatsächlich stattfindet, dann war er erwartet und daher keine Überraschung. Damit hat man bewiesen, dass die Ansage unter allen Umständen in sich widersprüchlich war – eine Überraschung gibt es nie –, und kann das Paradox in Ruhe zu den Akten legen: »Ex falso quodlibet«, aus einer falschen Aussage folgt Beliebiges, also muss man sich darüber nicht den Kopf zerbrechen.

Auf den zweiten Blick wirkt diese Überlegung etwas bizarr. »Rechne stets mit dem Schlimmsten, dann kann dich nichts überraschen« mag als Lebensregel für hartgesottene Pessimisten taugen und dem Seelenfrieden des Todeskandidaten aufhelfen. Die Schüler würden nach diesem Prinzip jeden Tag so intensiv lernen, wie man das am Tag vor einer Klassenarbeit zu tun pflegt – eine gute Idee und genau das, was der Lehrer mit seiner kryptischen Ankündigung beabsichtigte. Aber Überraschung? Denken wir uns zur Abwechslung eine Woche mit 300 Tagen – auf die Anzahl der Tage kommt es ja nicht an. Nach der Ankündigung passiert lange

nichts; am 124. Tag kommt der Test. Entsprechend der obigen Logik sagt ein Schüler zum anderen: »Das war vorher klar«; und alle stimmen zu. Da tut sich eine gewisse Diskrepanz zwischen dem umgangssprachlichen Verständnis und dem der formalen Logik auf.

Selbstbezügliche Ansage

Entsprechend haben die meisten Logiker diesen Versuch, das Problem wegzudiskutieren, verworfen und suchen weiter nach dem Denkfehler. Im Induktionsanfang steckt er nicht, zumindest nicht in der harten Version: Wenn es Freitag früh ist, und der Test hat noch nicht stattgefunden, dann findet er heute statt, und die Schüler können das aus dem verfügbaren Wissen erschließen. Also kann der Test am Freitag nicht stattfinden, weil das dem zweiten Teil der Ansage widersprechen würde.

Wie ist es mit dem ersten Induktionsschritt? Am Donnerstagmorgen wissen die Schüler, dass der Test heute oder morgen stattfindet; den morgigen Freitag hatten sie aber schon ausgeschlossen ... Halt!, sagen Jakob Derksen, der mit seinen umfangreichen Überlegungen den vorliegenden Artikel angestoßen hat, und mit ihm einige der zahlreichen Wissenschaftler. Den Frei-

tag ausschließen können die Schüler nur mit Wissen vom Freitagmorgen; das haben sie aber am Donnerstagmorgen noch nicht. Ganz im Gegenteil: Der Schluss, den sie heute ziehen (»am heutigen Donnerstag ist der Test«), steht im Widerspruch zu der Voraussetzung (»bis Freitag früh hat der Test noch nicht stattgefunden«), mit deren Hilfe sie den Freitag ausgeschlossen haben. Damit zieht sich die Argumentation vom Donnerstag ihre eigene Grundlage unter den Füßen weg und muss daher scheitern.

Dieser Gedankengang geht nun einem formalen Logiker gegen den Strich, denn er läuft darauf hinaus, dass man eine bereits abgeschlossene Argumentation (»am Freitag kann der Test nicht stattfinden«) nachträglich in Frage stellt. Aber formale Logik funktioniert – zumindest in der Vorstellung ihrer Vertreter – wie eine Maschine: Man steckt oben die Voraussetzungen hinein, und unten kommen die Folgerungen heraus. Zwischendurch hat die Maschine nach festgelegten Vorschriften gearbeitet; irgendwelche Zwischenprodukte haben dieselbe Qualität (»unumstößliche Wahrheit«) wie das Endergebnis, und für Selbstzweifel oder nachträgliche Revisionen ist kein Platz. Genau aus diesem Grund widmen sich die Logiker so intensiv dem »surprise exam paradox«: Wenn die Maschine in diesem Einzelfall ein falsches Ergebnis liefert, dann stellt das ihre Funktionsfähigkeit überhaupt in Frage.

Timothy Chow, Mathematiker am Massachusetts Institute of Technology, hat sich bereits 1998 sehr systematisch um eine Klärung bemüht. Nach langer Argumentation kommt er zu dem Ergebnis, dass die Ansage des Lehrers folgendermaßen zu formalisieren sei, damit das Paradox auf den Punkt getroffen wird:

Ansage A: In der nächsten Woche wird ein Test stattfinden, und es wird nicht möglich sein, das Datum des Tests zu erschließen, indem man Ansage A als unbestreitbare Wahrheit (»Axiom«) verwendet.

In dieser Formulierung wird die Tücke des Problems endlich offensicht-



CHRISTOPH POPPE

Moritz (links): »Unter den ersten drei Bechern war das Überraschungsei nicht. Dann muss es doch unter dem blauen sein.« **Max:** »Ja, aber das weißt du nicht.« – »Wieso das denn nicht?« – »Weil du das nicht wissen kannst.« – »Aber ich kann es doch logisch erschließen.« – »Kannst du nicht. Ich habe nämlich zum Axiom erklärt, dass du es nicht wissen kannst.« – »Bist du bescheuert, oder was?«

Existenzbeweis für den Osterhasen

Satz S lautet: »Wenn Satz S wahr ist, dann gibt es den Osterhasen.«

Behauptung: Satz S ist wahr.

Beweis: Satz S ist eine Wenn-dann-Aussage, oder, anders ausgedrückt, eine Aussage der Form »Aus V folgt F«, wobei in unserem Fall die Voraussetzung V lautet »Satz S ist wahr« und die Folgerung F »Der Osterhase existiert«. Wenn-dann-Aussagen beweist man, indem man V voraussetzt und zeigt, dass F daraus folgt.

Wir setzen V voraus, das heißt in diesem Fall, dass Satz S wahr ist. Also dürfen wir Satz S anwenden. Da nach Voraussetzung Satz S wahr ist, schließen wir daraus, dass der Osterhase existiert, was zu beweisen war.

Natürlich haben wir nicht bewiesen, dass es einen Osterhasen gibt, sondern dass man aus einem selbstbezüglichen Satz jeden Unsinn erschließen kann.

lich: Ansage A nimmt Bezug auf sich selbst. Und selbstbezügliche Aussagen können den größten Unsinn nach sich ziehen.

Das klassische Beispiel ist der Satz »Dieser Satz ist falsch«. Ist er wahr? Dann ist er falsch, genau das ist ja seine Aussage. Wenn er aber falsch ist, dann ist die Aussage »Dieser Satz ist falsch« falsch, also ist der Satz wahr ... Mit einem etwas raffinierteren selbstbezüglichen Satz lässt sich beweisen, dass der Osterhase existiert (Kasten oben).

Wegen dieser gefährlichen Eigenschaft pflegen die Logiker an ihrer Maschine ein großes Verbotschild aufzustellen: »Keine selbstbezüglichen Sätze einzufüllen«, und lehnen jede Haftung ab, wenn einem die Maschine bei Zu widerhandlung um die Ohren fliegt. Das passiert bei unserem Paradox nun gerade nicht, im Gegenteil: Seine Aussage erweist sich am Ende als wahr, und zwar, weil sie unterwegs als falsch erwiesen wurde.

Wenn ein verbotener Input wider Erwarten die Maschine heil lässt, ist das kein Anlass, das Verbot aufzuweichen, sagen manche logischen Fundamentalisten. Das hält Timothy Chow nun für übermäßig restriktiv und erinnert daran, dass Kurt Gödels berühmte Unvollständigkeitssätze auf selbstbezüglichen Aussagen beruhen. Gödel zeigt, dass man innerhalb eines gänzlich unverdächtigen Axiomensystems, nämlich des Standardsystems für die natürlichen Zahlen, eine Aussage konstruieren kann, die über sich selbst sagt: »Ich

bin innerhalb dieses Axiomensystems nicht beweisbar.«

Chow zeigt dann allerdings, dass die oben genannte Formalisierung mit der Ansage A auf einen Widerspruch führt. Insofern hat er das Paradox vom Standpunkt der Logik erledigt. Unerklärt bleibt, wieso die Schüler am Tag des Tests trotzdem überrascht sind und dem Lehrer damit zugestehen müssen, dass er seine Ansage erfüllt hat. Das wiederum lässt den Schluss zu, dass die obige Formalisierung den Punkt doch nicht trifft – jedenfalls nach dem Maßstab des gesunden Menschenverstands.

Ein Satz ist wahr, aber mit dem gegebenen Axiomensystem nicht beweisbar: Diese Situation lässt sich durch geeignet heimtückische Wahl des Axiomensystems leicht herbeiführen (Bild links). Es genügt, die Aussagen »Heute wirst du hingerichtet« und »Du weißt es nicht« zu Axiomen zu erklären. Das ist das Hinrichtungsparadox mit einer Woche, die nur aus einem Tag besteht. Heute kommt der Henker, und für den Verurteilten ist es eine Überraschung, weil er es – kraft Axiom – nicht wissen konnte.

Oder in der romantischen Version, die Martin Gardner in dem Artikel von 1963 erzählte: »Ein Mann sagt zu seiner Frau: ›Meine Liebe, ich möchte dich an deinem Geburtstag überraschen und dir ein völlig unerwartetes Geschenk machen. Du kannst es unmöglich erraten. Es ist jenes goldene Armband, das du letzte Woche bei Tiffany im Schaufenster gesehen hast.‹ Wie soll die arme

Frau das verstehen? (...) Vielleicht hält er sein Wort und schenkt ihr das Armband; dabei bricht er aber sein Wort, dass das Geschenk unerwartet sein soll. Auf der anderen Seite kann er sein Wort halten, was die Überraschung angeht, aber sein Wort brechen, was das Armband betrifft. Er kann ihr an Stelle des Armbands zum Beispiel einen neuen Staubsauger schenken. Da sich die Worte ihres Gatten selbst widersprechen, hat sie keine rationale Möglichkeit, (...) das Goldarmband zu erwarten. (...) Sie ist überrascht, dass sie an ihrem Geburtstag ein logischerweise völlig unerwartetes Armband geschenkt bekommt.«

Abermals hat sich der Widerspruch in nichts aufgelöst – und zwar, weil es ihn gab. ↞

DER AUTOR



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Chow, T. Y.: The Surprise Examination or Unexpected Hanging Paradox. In: American Mathematical Monthly 105, S. 41–51, 1998

Gardner, M.: Logik unterm Galgen. 2. Auflage, Vieweg, Braunschweig 1980

Lenzen, W.: Die Paradoxie der überraschenden Übung: logische, epistemologische und pragmatische Aspekte. In: Logique et Analyse 19, S. 267–284, 1976

Levy, K.: The Solution to the Surprise Exam Paradox. In: Southern Journal of Philosophy 47, S. 131–158, 2009

Quine, W. V.: On a So-Called Paradox. In: Mind 62, S. 65–67, 1953

Scriven, M.: Paradoxical Announcements. In: Mind 60, S. 403–407, 1951

Sorensen, R. A.: History of the Prediction Paradox. Kapitel 7 in: Blindspots. Clarendon Press, Oxford 1988

WEBLINKS

www.jakobderksen.de/HTML/ParadoxLL.htm Die Lösung, vollständig, von Jakob Derksen, 2013

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1343332

Unsere Evolution geht weiter

Noch in den letzten 30 000 Jahren haben sich die Menschen genetisch verändert und an neue Lebensbedingungen angepasst. Das wird auch weiterhin geschehen.

Von John Hawks

Keine andere Art greift in ihr eigenes Schicksal so stark ein wie der Mensch. Ob Naturgewalten, Krankheiten oder Raubtiere – zahllosen Gefahren, die unsere Vorfahren dahinrafften, wissen wir heute viel besser zu begegnen als früher. Für Nahrungsmittel sorgt eine Agrarwirtschaft im industriellen Maßstab. Selbst die Aussichten auf die Geburt von gesunden Kindern haben sich beträchtlich erhöht.

Nicht nur manche Wissenschaftsjournalisten, sondern sogar einige ausgewiesene Forscher behaupten: Weil der Mensch die Natur nun so gut beherrscht, ist unsere Evolution wohl zum Stillstand gekommen. Denn die technologi-

schen Errungenschaften würden uns dem Zugriff der natürlichen Selektion entziehen. Da heute die meisten ein hohes Alter erreichen, gelte das darwinsche Prinzip vom Überleben der Bestangepassten für den *Homo sapiens* nicht mehr.

Doch in Wahrheit ist unsere Evolution keineswegs beendet. Wir haben uns selbst noch in der jüngsten Vergangenheit biologisch verändert, und solange es uns gibt, wird das auch weiterhin geschehen. Projiziert man die sieben Millionen Jahre seit dem Zeitpunkt, an dem sich unsere Entwicklungslinie und die der Schimpansen getrennt haben, auf einen einzigen 24-Stunden-Tag, dann entsprechen die letzten 30 000 Jahre gerade einmal sechs Minuten. Aber in dieser



kurzen Zeitspanne, dem bisher letzten Kapitel unserer Evolutionsgeschichte, hat sich in biologischer Hinsicht eine Menge ereignet: Es gab große Wanderbewegungen in teils völlig neue Lebensräume und einige drastische Ernährungs-umstellungen. Die Gesamtbevölkerung ist in der kurzen Zeit um mehr als das 1000-Fache gewachsen, und die vielen Menschen brachten zahlreiche einzigartige Mutationen ein – eine Menge neues Material für das Wirken von Selektionskräften. Statt anzuhalten, erfuhr die menschliche Evolution hierdurch sogar einen Schub. Und die Beschleunigung wird sich fortsetzen.

Schon lange weckten prähistorische Skelette den Verdacht, dass manche unserer Merkmale ziemlich jung sind und rasche Anpassungen an neue Lebensumstände darstellen. So veränderte sich mit dem Übergang zum Ackerbau, der vor rund 11 000 Jahren im Nahen Osten seinen Anfang nahm, auch die menschliche Anatomie – etwa im Zusammenhang mit dem Kochen, das nun Einzug hielt. Beispielsweise waren die Zähne von Menschen in Europa, Asien und Nordafrika noch vor 10 000 Jahren um mehr als ein Zehntel größer als heute. Die Versorgung mit weich gekochter Nahrung erforderte jedoch augenscheinlich kein so kräftiges Kauen mehr wie zuvor die Ernährung der Jäger und Sammler, und so wurden Zähne und Kiefer allmählich kleiner.

Wie neu einige veränderte Merkmale tatsächlich sind, von denen Anthropologen eigentlich seit Jahrzehnten wussten, ergaben erst Genomstudien im neuen Jahrtausend. So enthält der Speichel bei heutigen Nachfahren von Ackerbauern

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

EVOLUTIONSGESCHICHTE DES MENSCHEN

- | | |
|---|--------------|
| Teil 1 ► Menschwerdung in neuem Licht
<i>Kate Wong</i> | Januar 2015 |
| Unsere unübersichtliche Verwandtschaft
<i>Bernard Wood</i> | |
| Teil 2 ► Menschenrevolution durch Klimaschwankungen
<i>Peter B. deMenocal</i> | Februar 2015 |
| Teil 3 ► Gewinner der Evolutionslotterie
<i>Ian Tattersall</i> | März 2015 |
| Teil 4 ► Stark als Paar
<i>Blake Edgar</i> | April 2015 |
| Teil 5 ► Gute Zusammenarbeit
<i>Gary Stix</i>
Die Wurzeln der Kooperation
<i>Frans de Waal</i> | Mai 2015 |
| Teil 6 ► Unsere Evolution geht weiter
<i>John Hawks</i>
Lass das, Papa: nicht googeln!
<i>Interview mit Sherry Turkle</i> | Juni 2015 |

Die Menschheit wird bei aller Migration und Vermischung nicht einheitlicher werden – im Gegenteil.


ISTOCK / RAWPIXEL LTD



FOTOLIA / PIXEL & CRÉATION



FOTOLIA / RAWZAZARUS

in der Regel deutlich mehr Amylase als bei modernen Jägern und Sammlern. Dieses Enzym zerlegt Stärke in kleinere Zuckereinheiten. Die meisten heutigen Menschen besitzen von dem zugehörigen Gen – *AMY1* – mehrere Kopien, manchmal über zehn. Dagegen haben zum Beispiel die traditionell lebenden Datooga in Tansania nur ganz wenige Kopien dieses Gens. Das Phänomen findet sich weltweit. Wo Menschen Getreide anbauten, muss es sich für sie ausgezahlt haben, die Stärke schon beim Kauen gut aufschließen zu können.

Zu den am besten untersuchten Anpassungen an die Landwirtschaft zählt die Laktosetoleranz im Erwachsenenalter. An sich bilden zwar Säuglinge und Kleinkinder das im Darm zum Abbau von Milchzucker (Laktose) benötigte Enzym Laktase, doch die Herstellung wird später bei der Mehrzahl der Menschen eingestellt. Mindestens fünfmal in der jüngeren Vergangenheit setzten sich allerdings unabhängig voneinander Mutationen durch, die auch Erwachsenen eine Verwertung von Milch erlauben. Dies geschah etwa bei drei Völkern Afrikas südlich der Sahara mit einer langen Tradition der Rinderhaltung. Eine weitere solche Mutation kommt in Arabien vor. Offenbar hatte sie einst Populationen von Kamel- und Ziegenhirten Vorteile gebracht.

Am häufigsten und heute am weitesten verbreitet ist die fünfte solche Mutation. Sie findet sich bei Bevölkerungen aus Irland bis Indien mit Schwerpunkt in Nordeuropa, wo meist über 90 Prozent der Individuen sie tragen. Offenbar röhrt sie von einem einzigen Menschen her, der vor schätzungsweise 7500 Jahren lebte (siehe SdW 4/2014, S. 70). Der berühmte Gletschermann »Ötzi«, der vor 5500 Jahren in den Südtiroler Hochalpen starb, besaß sie nicht. Vielleicht kam die Genvariante damals im Alpenraum noch wenig vor. Auch bei den frühen europäischen Bauern fehlte sie wohl. Sie fand sich zumindest in keiner DNA-Probe von über 5000 Jahre alten Skeletten. Dass heute in derselben Region gut drei Viertel der Menschen diese Genversion tragen, ist nur scheinbar widersprüchlich, denn die Diskrepanz lässt sich mit Hochrechnungen zu den Auswirkungen einer natürlichen Selektion erklären: Eine vorteilhafte Mutation nimmt in einer Population leicht überhand, wenn ihre Häufigkeit im Lauf der Generationen exponentiell steigt. Eine Zeit lang macht sich die neue Variante noch wenig bemerkbar; doch erscheint sie erst häufig genug, kann sie bald vorherrschen.

Auch erstaunlich viele äußerliche Merkmale der heutigen Menschen haben keine lange Vergangenheit. Das starke, glatte Haar der Ostasiaten beruht zum Beispiel wesentlich auf einer Mutation in dem Gen *EDAR*, die sich erst vor gut 30 000 Jahren ereignete. Das Genprodukt ist für die Steuerung der frühen Entwicklung von Haut, Haaren, Zähnen und Nägeln wichtig. Auch die amerikanischen Ureinwohner trugen bereits diese Variante, als sie Amerika besiedelten.

Tatsächlich ist die Evolutionsgeschichte unserer Haut-, Haar- und Augenfarbe oft bemerkenswert jung. Anfangs dürften die Menschen generell dunkle Augen und Haare sowie eine dunkle Haut gehabt haben. Aber mit der Zeit traten Dutzende Mutationen auf, die eine hellere Pigmentierung bewirkten. Ein paar davon sind so alt, dass sie schon bei Afri-

AUF EINEN BLICK

DIE MENSCHHEIT WIRD BUNTER

1 Auch in der jüngeren menschlichen Vergangenheit kam unsere Evolution nicht zum Stillstand. Etliche Beispiele zeigen: In den letzten 30 000 Jahren und sogar noch in den letzten 10 000 Jahren ermöglichten neue **Mutationen** biologische **Anpassungen an veränderte Lebensbedingungen**. Dazu gehören kulturelle Errungenchaften wie die Milchwirtschaft.

2 Weil die Bevölkerungen nach der Umstellung auf den Ackerbau stark zunahmen, stieg mit der größeren Menschenzahl auch das Angebot an potenziell günstigen neuen genetischen Varianten, an denen **Selektionsmechanismen** angreifen konnten. Das steigerte die **Evolutionsgeschwindigkeit**.

3 Fraglos wird der Mensch auch künftig evolvierten. Obwohl sich die modernen Bevölkerungen zunehmend mischen, wird es den **kosmopolitischen Einheitstyp** nicht geben. Dazu sind die einzelnen Merkmale zu unabhängig voneinander.



Viele Merkmale heutiger Menschen entstanden erst in den letzten 30 000 Jahren. Dazu gehören etwa helle Haut, blaue Augen, kräftiges, glattes, dunkles Haar und Milchverträglichkeit im Erwachsenenalter.

kanern vorkommen. Bei außerafrikanischen Bevölkerungen erscheinen diese Genvarianten allerdings häufiger. Doch die meisten solchen Mutationen sind jüngeren Ursprungs und für bestimmte Menschengruppen charakteristisch. So verleiht eine Veränderung im Gen *TYRP1* manchen Bewohnern der Salomonen im Pazifik ihre blonde Haarfarbe. Rotschöpfe gehen auf eine Veränderung im *MC1R*-Gen zurück, das vorher für dunkles Haar sorgte. Bei blauen Augen – nicht nur von Europäern – scheint immer eine Mutation im *HERC2*-Gen beteiligt zu sein, die wahrscheinlich vor über 9000 Jahren auftrat. Die helle Haut der Europäer wiederum hängt mit einer Abweichung im Gen *SLC24A5* zusammen. Dass sich diese Variante noch nicht im Erbgut von Skeletten aus jener Zeit findet, zeugt davon, wie rasch sich Hellhäutigkeit ausgebreitet haben muss. Überhaupt hat sich die Pigmentierung, auch von Haaren und Augen, in Bevölkerungsgruppen mitunter wohl verblüffend schnell gewandelt.

Genvariante gegen Körpergeruch

Auch weniger auffällige Merkmale variieren zwischen Menschengruppen – zum Beispiel die Konsistenz des Ohrschnapses. Bei den meisten Menschen ist es feucht und klebrig, doch viele Ostasiaten produzieren eine trockene, schuppige Substanz, die nicht verklebt. Anthropologen wissen das seit über 100 Jahren, aber erst jetzt fanden Genetiker die Ursache: eine zwischen 30000 und 20000 Jahre alte Mutation im Gen *ABCC11*, die sich auch auf die Schweißdrüsen auswirkt. Riecht der Achselschweiß unangenehm und hat man klebrig-ses Ohrschnapf, besitzt man ziemlich sicher die Ursprungsversion des Gens. Menschen mit der Mutation haben weniger Bedarf an Deodorant.



Vor etwa 45 000 Jahren trat in Afrika eine Mutation auf, die Menschen vor der Malaria tertiana schützt, die der Erreger *Plasmodium vivax* hervorruft. Dieser Parasit zählt heute zu den beiden weltweit vorherrschenden Malariaerregerarten. Früher war er auch in Europa häufig. (Der andere ist *P. falciparum*; er erzeugt die besonders gefährliche Malaria tropica.) *P. vivax* entert rote Blutkörperchen mittels eines auf ihnen sitzenden Moleküls, genannt Duffy-Rezeptor. Bei der betreffenden Mutation ist dessen Gen namens *DARC* defekt, und der Rezeptor fehlt. Der Erreger kann die Blutzellen daher nicht befallen. Im Afrika südlich der Sahara tragen 95 Prozent der Bevölkerung das mutierte Gen, in Europa und Asien dagegen nur 5 Prozent.

Unter Evolutionsprozessen pflegen wir uns gewöhnlich vorzustellen, dass »gute« Gene »schlechte« ersetzen. Unsere eigenen genetischen Anpassungen aus der jüngsten Zeit bezeugen hingegen die große Bedeutung evolutionärer Zufälle. Denn vorteilhafte Mutationen bleiben keineswegs automatisch erhalten. Entscheidend dafür sind vielmehr sowohl der Zeitpunkt ihres Auftretens als auch die Größe der betreffenden Population.

Ich selbst erfuhr hiervon zum ersten Mal in den 1990er Jahren als junger Student an der University of Michigan in Ann Arbor. Dort lehrte der als Malariafachmann bekannte Anthropologe Frank Livingstone (1928–2005). Zeit seines Forscherlebens untersuchte er die populationsgenetischen Zusammenhänge verschiedener Malariaresistenzen, darunter jene Form, die mit der Sichelzellenanämie zusammenhängt.

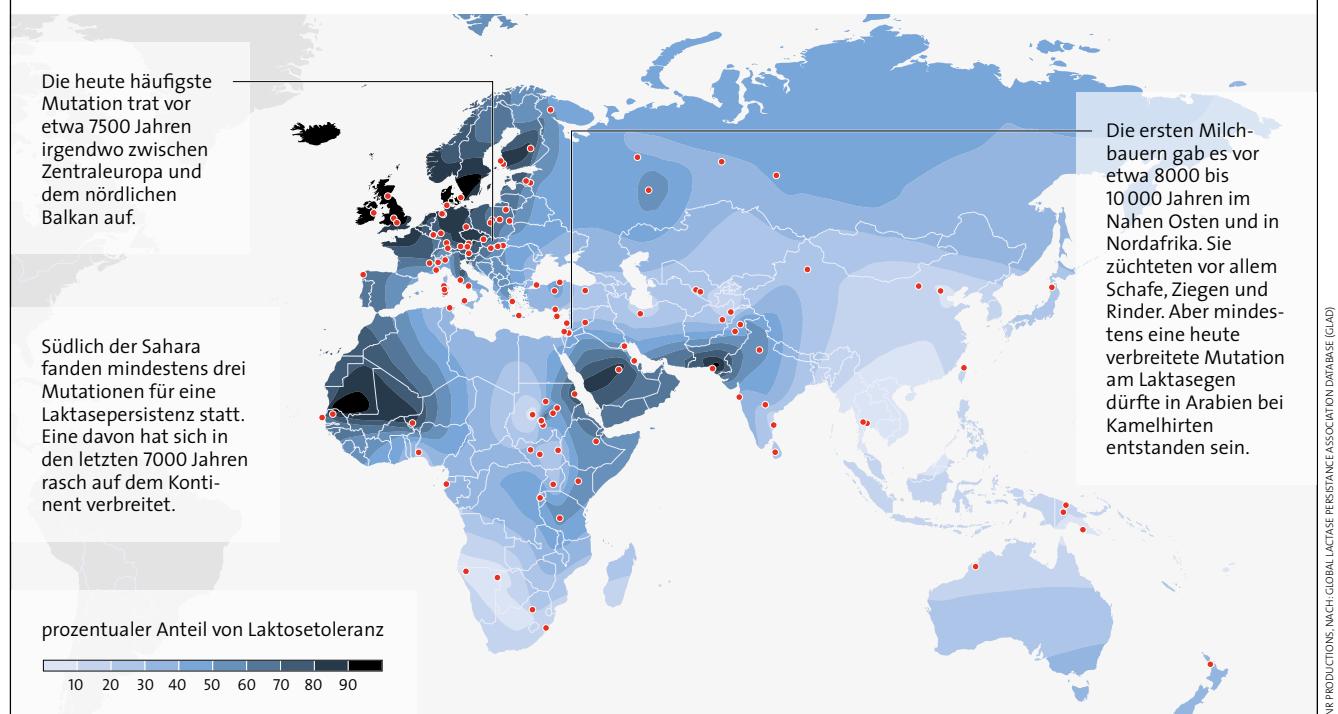
Vor über 3000 Jahren dürfte in oder bei Afrika eine Mutation in einem der Gene für den roten Blutfarbstoff Hämoglobin aufgetaucht sein, der Sauerstoff bindet. Wenn jemand das veränderte Gen von beiden Eltern geerbt hat, also doppelt besitzt, entsteht abnormes Hämoglobin, so genanntes Hämoglobin S. Bei Sauerstoffmangel und körperlicher Anstrengung werden die roten Blutzellen sichelförmig und unelastisch – und können dann feine Blutgefäße verstopfen, was oft schwere Krankheitsbilder bedingt, darunter auch

Milch lebenslang

Normalerweise vertragen nur kleine Kinder Laktose (Milchzucker). Später wird das zum Abbau im Darm benötigte Enzym Laktase nicht mehr gebildet. Aber bei Menschen, die Milch gebende Tiere hielten, setzten sich in den letzten 10 000 Jahren verschiedene Mutationen durch, die das Abschalten des Laktase-

gens verhindern. Fünf davon haben Forscher bisher aufgespürt, doch dürfte es noch mehr geben.

Die roten Punkte zeigen Orte, an denen die Daten erhoben wurden. Die Tiefe des Blaus gibt den Anteil der Bevölkerung wieder, der Milchzucker verträgt.



Blutarmut. Wer das Gen nur einmal trägt, bleibt normalerweise gesund. Allenfalls leichte Auswirkungen können auftreten. Die Mutation verleiht einen gewissen Schutz vor der Malaria tropica, weil sie verhindert, dass deren Erreger in die roten Blutkörperchen eindringen.

Eine weitere mutierte Form des Hämoglobins, die Livingstone interessierte, war das Hämoglobin E. Es ist besonders in Südostasien weit verbreitet und schützt die Träger in hohem Maß gegen Malaria – und das außerdem oft, ohne so schwere Krankheiten zu verursachen wie eine Sichelzellenanämie. Deshalb fragte ich Livingstone in seinem Seminar: »Hämoglobin E scheint doch viel besser zu sein als Hämoglobin S. Wieso haben es die Afrikaner dann nicht auch erworben?« Er antwortete nur: »Dort ist das einfach nicht passiert.« Zuerst war ich verblüfft, denn die natürliche Selektion hielt ich für den wirksamsten Evolutionsfaktor. Die Malaria tropica sucht Afrika seit Jahrtausenden heim. Da sollte es Selektionskräften doch inzwischen gelungen sein, die nützlichsten Mutationen dagegen durchzusetzen und weniger günstige auszumerzen.

Aber Livingstone erklärte uns, dass sich Hämoglobin E dort offenbar nicht hatte verbreiten können, weil Hämoglobin S schon vorhanden war. In einer Bevölkerung mit aus-

schließlich normalem Hämoglobin vermöge sich eine neue schützende Variante gegen Malaria zwar rasch zu etablieren. Besitzt die Population jedoch schon einen gewissen genetischen Schutz, bewirkt die neue Variante einfach nicht mehr genug. Weil schon Hämoglobin S die Sterberate verringert, bietet Hämoglobin E in dem Fall keinen wirklich nennenswerten zusätzlichen Vorteil, der in der Selektion eine Rolle spielt. Ich begriff, dass es entscheidend darauf ankommt, welche Mutation zuerst erscheint. Unter Umständen gewinnt eine nur bedingt günstige Variante, die sich fatal auswirken kann. Bei Malaria war das in Afrika offenbar der Fall – zumindest in den wenigen Jahrtausenden, in denen Menschen der Seuche bisher ausgesetzt waren.

Seit Malaria menschliche Bevölkerungen heimsucht, kamen in den verschiedenen Weltregionen diverse genetische Anpassungen für mehr Widerstandskraft gegen die Erkrankung auf. Stets war zunächst eine zufällige Mutation aufgetaucht, die sich in einer lokal begrenzten Population halten konnte, wenn ein paar Menschen sie erbten und ihrerseits weitergaben. Im Prinzip hatte jedes einzelne solche Merkmal nur sehr geringe Chancen, langfristig zu überdauern. Doch hier half die riesige und immer weiter wachsende Population der Menschen, denn das bedeutete unzählige Gelegen-

heiten für vorteilhafte neue Eigenschaften, sich zufällig in einer Bevölkerung festzusetzen.

Auch heutzutage geht die Evolution in den Populationen der Menschen weiter. Das Wirken der Selektion in der ferne ren Vergangenheit können Forscher nur indirekt anhand langfristiger genetischer Effekte erschließen. Dagegen lässt sich das aktuelle Geschehen unmittelbar verfolgen, etwa an Trends im Bereich von Gesundheit und Fortpflanzung.

Beispielsweise verhindern alle medizinischen und hygienischen Fortschritte nicht, dass die Kinderzahl der einzelnen Menschen in vielen Bevölkerungen weiterhin auch von der individuellen genetischen Ausstattung abhängt. Zum Beispiel haben in Afrika südlich der Sahara Frauen, die während der Malariaaison schwanger sind, eine etwas höhere Chance als sonst, ein lebendes Kind zu gebären, wenn sie eine bestimmte Variante des *FLT1*-Gens tragen. Das Risiko, dass Malariaerreger die Plazenta infizieren, ist für sie geringer. Wie das mit dem Gen zusammenhängt, weiß man noch nicht, aber der Effekt lässt sich messen.

Kinderzahl und Körpergröße

Aufmerksamkeit erregte eine Studie, die Stephen Stearns von der Yale University in New Haven (Connecticut) mit seinen Kollegen durchführte. Sie durchforsteten umfangreiche Datensätze von langjährigen Erhebungen in den USA zur Gesundheit der Bevölkerung nach Merkmalen, die mit der Kinderzahl korrelierten. Heraus kam dabei: Während der letzten 60 Jahre gebaren in den Vereinigten Staaten solche Frauen im Vergleich etwas mehr Kinder, die eher kleiner waren als der Durchschnitt, mehr wogen und einen niedrigen Cholesterinspiegel aufwiesen. Größere, schlankere Frauen mit höheren Blutwerten bekamen etwas weniger Nachwuchs. Eine evolutionäre Erklärung dafür steht allerdings noch aus.

Evolutionsforscher interessieren sich auch für medizinische und genetische Großprojekte, die inzwischen in verschiedenen Ländern laufen, um die oft komplizierten Zusammenhänge zwischen Gesundheit und Erbanlagen allmählich besser zu verstehen. Ein Beispiel ist die nationale Einrichtung UK Biobank in Großbritannien: In deren Rahmen gewinnen und analysieren Wissenschaftler von einer halben Million Menschen über Jahre hinweg medizinische und genetische Daten. Die Befunde sollen helfen, die Behandlung und Diagnose vieler Krankheiten zu verbessern, aber auch, die Vorsorge zu optimieren. Solche Studien müssen dermaßen umfangreich angelegt sein, weil sich die komplexen genetischen Wechselwirkungen oft erst dann deutlich zeigen. Auch hinsichtlich der menschlichen Evolution entgehen einem viele Einflüsse, wenn man sich auf die Vergangenheit der Menschheit beschränkt, weil man dann die langen Zeiträume nur im Nachhinein betrachten kann. Die Laktosetoleranz im Erwachsenenalter etwa hat sich über viele Generationen etabliert, und feststellen lässt sich heute zwar das Ergebnis, nicht aber, wie sich die Entwicklung tatsächlich abspielte. Die kurzzeitige Dynamik unter Beteiligung von Umwelteinflüssen, Überleben und Fortpflanzung

liegt im Dunkeln. Dank der laufenden und geplanten Großprojekte an heutigen Populationen könnte sich die Situation nun ändern. Für die Forschung bieten solche Studien Gelegenheit, tieferen Einblick in aktuelle Evolutionsprozesse beim Menschen zu gewinnen als jemals zuvor.

Wie wird die menschliche Evolution in Zukunft verlaufen? Obwohl einzelne Bevölkerungen in den letzten Jahrtausenden erkennbar unterschiedliche Wege gegangen sind, blieb die Menschheit im Ganzen dennoch letztlich überraschend gleich. Neue, vorteilhafte Mutationen, die sich einen Platz im Genpool erobern haben, verdrängten die alten Genversionen in den meisten Fällen jedoch nicht völlig. Und heute, da die Menschen räumlich viel beweglicher sind als früher, durchmischen sich die Populationen weltweit in bisher ungekannter Größenordnung.

Man könnte nun erwarten, dass der zunehmende genetische Austausch die Menschheit allmählich immer homogener macht. Würde nicht beispielsweise das Mischen all der Gene, die unabhängig voneinander zur Haut-, Haar- und Augenfarbe beitragen, am Ende eine ziemlich einheitliche Pigmentierung hervorbringen, etwa ein helles Schokoladenbraun? Antwort: mit Sicherheit nicht. Denn viele jener Eigenschaften, in denen sich die Menschenpopulationen unterscheiden, addieren sich nicht einfach. In Ländern wie den USA, Mexiko oder Brasilien mit ethnisch gemischter Bevölkerung zeigt sich das gut. Die Menschen dort tendieren keineswegs zu einem einheitlichen, hellbraunen Aussehen, im Gegenteil. Man kann Personen mit blonden Haaren, dunkler Haut und Sommersprossen begegnen oder Leuten mit olivfarbigem Teint und grünen Augen. Jeder zukünftige Mensch wird ein individuelles Mosaik aus unserer Evolutionsgeschichte sein. ~

DER AUTOR



John Hawks hat an der University of Wisconsin in Madison eine Professur für Anthropologie. Seine Forschungen umfassen die menschliche Evolution von ihren Anfängen bis in die Gegenwart. In Südafrika war er an den Ausgrabungen der spektakulären Fossilien in der Rising-Star-Höhle beteiligt. Andere seiner Projekte betreffen die Genetik von Neandertalern und modernen Populationen.

LITERATURTIPPS

Evolution. Wie sie die Geschichte des Lebens geformt hat. Spektrum der Wissenschaft Spezial Biologie, Medizin, Hirnforschung 1/2014
Mit Beiträgen zur Evolutionstheorie sowie zum Evolutionsverständnis von Krebs

Der Menschen-Code. Wie uns die Gene prägen. Spektrum der Wissenschaft Spezial Biologie, Medizin, Kultur 4/2012
Die Artikel behandeln unter anderem die Evolutionsgeschichte von Krankheiten und die medizinische Genetik.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1343330

Lass das, Papa: nicht googeln!

Die amerikanische Soziologin und Psychologin **Sherry Turkle** erforscht die sozialen Auswirkungen der neuen Medien. Sie warnt davor, über der digitalen Welt physische Kontakte zu vernachlässigen.



PETER URBAN MIT FOTO GEN VON SHERRY TURKLE

Professor Turkle, die meisten von uns gehen ständig mit sozialen Medien um. Was macht Ihnen dabei die meisten Sorgen?

PROF. DR. SHERRY TURKLE: Mir fällt auf, dass Menschen Alleinsein ungeheuer schlecht aushalten. Unter anderem beobachte ich sie an Ampeln oder im Supermarkt vor der Kasse. Kaum hat jemand nur eine Sekunde Zeit, schon macht er was mit seinem Handy. Viele Studien besagen, dass die Fähigkeit, allein zu sein, verschwindet. Was dadurch passieren kann, ist: Die kurzen Momente, in denen man sonst vielleicht einem Tagtraum nachhinge oder über sich selbst nachdenken würde, gehen verloren. Statt in sich hinein sieht man immerzu nach außen.

Gilt das für Menschen jeden Alters?

TURKLE: Ja, aber vor allem Kinder brauchen es, mit sich allein zu sein. Für sich sein können und sich selbst entdecken ist das Fundament von Entwicklung. Doch heute gibt man schon den Kleinsten – sogar Kindern von zwei, drei, vier Jahren – technische Hilfsmittel, die sie ablenken und ihnen damit das Gefühl nehmen, mit sich allein zu sein. Paradoxerweise erschwert ihnen gerade dies, echte Beziehungen aufzubauen.

Vielleicht wollen Menschen sich nur nicht langweilen.

TURKLE: Die Leute behaupten, sie bräuchten keine Pausen für kurzes Abschalten. Sobald ein Loch auftritt, greifen sie zum Handy. Pausen machen ihnen Angst. Gespräche zu führen oder Beziehungen zu pflegen – wozu auch Lücken gehören –, haben sie nicht gelernt.

Sind uns denn heute zwischenmenschliche Beziehungen weniger wert?

TURKLE: Die Menschen beginnen, andere ein bisschen als Objekt zu betrachten. Angenommen, zwei Personen haben

ein Treffen verabredet, und einer sagt zu Beginn: »Wie wär's, wenn wir so eine Google-Brille aufsetzen? Falls unsere Unterhaltung mal ein bisschen stockt, kann ich meine Mails abfragen. Das merkst du gar nicht.« Solches Verhalten bringt auch Risse ins Familienleben. Wenn beim Essen mit der ganzen Familie Tante Langweilig das Wort ergreift, holt die kleine Nichte flugs ihr Handy oder I-Phone raus, geht auf Facebook – und taucht in eine Welt der Schneeballschlachten und Ballerinas ein. Die gemeinsame Mahlzeit ist kaputt. Früher war das wünschenswerte Ideal der Familie, dass sich alle gemeinsam um den Tisch versammeln. Das wurde von Facebook verdrängt.

Was ist mit Leuten, die ihr Telefon sogar im Bett immer bei sich haben? Die schlafen doch, warum sollen sie sich da allein fühlen?

TURKLE: Ich habe genügend Mittel- und Oberschüler gefragt, ob sie mitten in der Nacht SMS (*kurze Nachrichten auf dem Handy, Anm. d. Red.*) beantworten. »Ja, klar«, höre ich dann. Sie leben nach dem Motto: Ich nehme teil, also bin ich. Die Befragten fühlen sich verpflichtet, zu reagieren. Erwartet wird ständige Erreichbarkeit. Alle sind darauf eingestellt, immer gegenseitig Rat und Zustimmung einzuholen. Zurzeit mache ich eine Fallstudie über eine junge Frau, die bei der Plattform Instagramm 2000 »Follower« hat. Sie stellt abends um neun eine Frage und bekommt um zwei Uhr nachts Antworten. Und sie liest sie auch gleich. Eine ganze Menge Kids sind dann also wach.

Wohin führt solch eine Lebensweise?

TURKLE: Wenn man nicht irgendwann innehält, glaube ich, kann sich das Gefühl für ein autonomes Selbst nicht voll entwickeln. Man vermag dann weder private noch berufliche Beziehungen zu führen, denn man fühlt sich nicht ganz dazu

Sherry Turkle ist Professorin für Wissenschaft, Technologie und Gesellschaft am MIT (Massachusetts Institute of Technology) in Cambridge. Mit ihren Büchern und anderen Veröffentlichungen zu sozialen Themen der modernen Gesellschaft erreicht sie viele Menschen. Auf Deutsch erschien 2012 ihr Buch: »Verloren unter 100 Freunden: Wie wir in der digitalen Welt seelisch verkümmern«.

fähig, Wichtiges selbst in die Hand zu nehmen. Man bekommt Schwierigkeiten, weil man es gewohnt ist, über alles und jedes erst abstimmen zu lassen.

Man »crowdsourct« sein Leben, lagert es quasi aus?

TURKLE: Man crowdsourct wichtige Entscheidungen. Vielleicht merken Leute, wenn sie erst im Berufsleben stehen – aber wohl nicht, bevor sie über 30 sind –, irgendwann, dass ihnen das nicht mehr so recht gefällt. Dann würden sie emotionale Fähigkeiten entwickeln, mit denen sie sich wirklich noch nie auseinandersetzt haben.

Was halten Sie vom Umgang mit simulierten Personen und menschenähnlichen Robotern?

TURKLE: In den 1970er Jahren, als solche Fragen aufkamen, glaubte man: Selbst wenn simuliertes Denken vielleicht tatsächlich Denken darstellt, handelt es sich bei simuliertem Fühlen jedoch sicher nicht um wirkliches Fühlen. Simulierte Liebe könnte niemals richtige Liebe sein. Aber heute sagen mir Leute: Wenn »Siri« sie noch ein bisschen besser täuschen könnte, würden sie sich gerne mit ihr unterhalten (*Siri, ein Sprachassistent, versteht gesprochene Sätze, antwortet, führt Anweisungen aus und liefert Informationen; Anm. d. Red.*).

Wäre das nicht ähnlich wie in dem amerikanischen Sciencefiction-Liebesfilmdrama »Her«, in dem ein Mann eine innige Beziehung zu der von ihm geschaffenen weiblichen Computeranimation Samantha eingehet?

TURKLE: Ganz genau. Offenbar gilt heute: Wenn mir ein Roboter vorgaukeln kann, dass er mich versteht und mitfühlt, darf er gern mein Gefährte sein. Diese Entwicklung ist bemerkenswert in Bezug darauf, was wir von zwischenmenschlichen Beziehungen erwarten, gerade auch in intimen Dingen. Ich beobachte das an Kindern wie an Erwachsenen. Die neuen Roboter sind dafür konstruiert, uns das Gefühl zu ge-

ben, sie würden uns verstehen. Andererseits behauptet niemand, sie würden auch nur irgendetwas wirklich verstehen.

Welche Grenze ist da überschritten? Dass dabei Empathie fehlt?

TURKLE: Es gibt keinen echten Austausch. Ich habe eine Frau befragt, die sagte, sie wäre mit einem Roboter als Freund zufrieden. Sie wünscht sich einen dieser hoch entwickelten japanischen Roboter. Als ich bemerkte: »Aber Sie wissen doch, dass er Sie nicht versteht?«, meinte sie: »Ach, etwas soll mir einfach das Gefühl geben, dass ich nicht allein bin.« Man liebäugelt auch mit Robotern, die älteren Menschen Gesellschaft leisten. Damit habe ich allerdings ein moralisches Problem. Ich finde, alte Leute haben es verdient, ihre Lebensgeschichte jemandem zu erzählen, der versteht, was ein Leben ist. Sie haben Partner verloren, Kinder verloren. Nun sollen sie das einem Ding vortragen, das keine Ahnung hat, was Leben oder ein Verlust bedeuten. Mir ist der Aspekt wichtig, dass es bei diesem Wandel im sozialen Austausch nicht nur um technologische Entwicklungen geht, sondern darum, wie wir uns dabei verändern. Ich hoffe, wir werden uns bald eingehend damit auseinandersetzen, wann Menschen einem Roboter bereitwillig Menschlichkeit zuschreiben und eine Fassade von Empathie als Ersatz für wahre Empathie akzeptieren. Meines Erachtens führen solche Kontakte in die Sackgasse. Wollen wir das wirklich immer mehr von der Technologie – und von Menschen immer weniger?

Stellen uns Avatare und virtuelle Realität vor dieselben Probleme? Also zum einen von Teilnehmern im Netz ausgedachte virtuelle Stellvertreter und zum anderen die virtuelle Welt, in die man mit Spezialgeräten mit seinen Sinnen eintaucht?

TURKLE: In beidem bewegen wir uns weg vom Leben hin zu einer Mischung aus realem und virtuellem Dasein. Ein junger Mann brachte es sehr prägnant auf den Punkt: »Das reale Leben ist nur eines meiner Fenster und nicht unbedingt mein bestes.« Eine Zeit lang geriet virtuelle Realität ziemlich in Vergessenheit. Durch die Übernahme der Virtual-Reality-Brille Oculus durch Facebook rückt sie wieder mehr ins Blickfeld – Mark Zuckerbergs Fantasie, wonach wir uns mit unseren Freunden in einer virtuellen Welt treffen, in der jeder wie Angelina Jolie oder Brad Pitt aussieht, in einer wundervollen Wohnung lebt und nur zeigt, was er zeigen will. Immer mehr beginnen wir dergleichen für ein Wunschbild zu halten.

Kritische Stimmen sagen, dass sich ein Avatar vom realen Ich im Grunde nicht unterscheidet.

TURKLE: Nun ja, wir alle schauspielern immerzu. Jetzt gerade gebe ich meine beste Sherry Turkle. Sie ist schon ganz anders, wenn sie im Schlafanzug herumhängt. An einem Avatar oder bei Facebook ist allerdings noch etwas anders: Man bearbeitet seinen Auftritt. Eine Frau postet ein Foto von sich und manipuliert die Farben, den Hintergrund, die Beleuchtung. Warum? Weil sie es auf bestimmte Weise haben will. Es gefällt den Leuten, dass so etwas heute möglich ist. Einen 18-Jährigen habe ich gefragt: »Was ist an einem Gespräch so schlimm?« Die Antwort: »Dass es in Echtzeit läuft. Man hat

keine Kontrolle über das, was man sagt.« Das lässt tief blicken. Aus demselben Grund erledigen viele ihre Angelegenheiten lieber per E-Mail. Hier handelt es sich nicht nur darum, den Zeitpunkt nach eigenem Belieben zu wählen, sondern darum, eine Mitteilung polieren zu können.

Die Menschheit verdankt ihren Aufstieg unter anderem dem Leben in Gruppen. Es förderte die Chancen des Einzelnen. Wird der Trend zum Online-Dasein diese Vorteile nun untergraben?

TURKLE: Das ist tatsächlich die entscheidende Frage – ob wir unseren Konkurrenzvorteil zunichtenmachen oder ob wir ihn erweitern. Viele meiner Kollegen glauben Letzteres. Das Internet hält ja neue Möglichkeiten bereit, zusammenzukommen und Beziehungen aufzubauen. Allerdings glaube ich, wir stehen an einem Wendepunkt. Im virtuellen Rausch haben wir den Bezug zum wirklichen Leben verloren. Wir müssen zwischen der Verführkraft des Virtuellen und dem realen Leben in unserem Körper und auf diesem Planeten balancieren.

Ihre Kritiker sagen, es gäbe keinen Anlass zur Sorge, weil die »neue Technologie« nicht wirklich neue Verhältnisse schafft. Das Gleiche hätten wir schon mit dem Fernsehen erlebt – klassisches Beispiel: Der Fernseher hüte die Kinder, dann muss man nicht selbst auf sie aufpassen.

TURKLE: Zunächst einmal kann Fernsehen durchaus ein Gruppenerlebnis sein. Ich bin in einer Familie aufgewachsen, in der alle zusammen vor dem Fernseher saßen. Wir stritten uns, welches Programm wir sehen wollten, und haben auch über Sendungen geredet. Das gibt es natürlich nicht, wenn sich jeder in seinem Zimmer sein eigenes Programm zusammenstellt. Eine Technologie, die immer mit dabei ist, wirklich stets angeschaltet bei einem – das ist ein Quantensprung. Ich gebe zu, solche Quantensprünge gab es auch früher schon: etwa das Buch. Der Unterschied ist aber: Wenn etwas immer bei mir ist, heißt das, ich habe keine Wahl mehr.

Sie meinen, Fernsehen kann man ausschalten und dann trotzdem funktionieren?

TURKLE: Ohne Handy und E-Mails kann ich meinen Beruf und mein Privateben nicht mehr führen. Meine Studenten kommen ohne diese Hilfsmittel nicht einmal an den Lehrplan heran. Aus der Welt dieser Technologie können wir uns nicht ausklinken. Ich frage aber, wie sich solch ein Leben sinnvoller einrichten lässt, bei dem etwas immer angeschaltet und ganz mit dabei ist. Lange wird es ja nicht mehr dauern, bis man das im Ohr, an der Jacke oder in der Brille trägt ...

Wie sollten wir also damit umgehen?

TURKLE: Es werden sich Gepflogenheiten herausbilden, wie man das handhabt. Ich denke, hierbei werden Unternehmen mitwirken, weil sie merken, dass Menschen das ständige Vernetzsein nicht gut vertragen. Auch die Umgangsformen müssen einbezogen werden: Mittlerweile machen sich Leute ja schon Sorgen, wenn jemand auf eine Nachricht nach spätestens 24 Stunden noch nicht geantwortet hat. Warum bloß? Ich glaube, diese Erwartung, immer erreichbar zu sein und immer reagieren zu müssen, wird sich ändern.

Wo könnte man anfangen? Haben Sie schon Ideen?

TURKLE: Eine wäre, dass es geschützte Bereiche geben sollte: etwa das gemeinsame Abendessen, das Auto. Solche Taburäume könnten Ort für Gespräche sein. Die wirken als Gegen-gift gegen viele der von mir angeführten Erscheinungen. Sich mit den Kindern zu unterhalten, mit der Familie, mit anderen Leuten, hilft, dass jene unerwünschten Folgen nicht überhandnehmen.

Sollten wir auch Sinn und Zweck der Technologien stärker erörtern?

TURKLE: Also, ich bin keine Gegnerin dieser Technologien. Mein Anliegen ist vielmehr, dem Miteinandersprechen und dem menschlichen Geist mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Letztlich impliziert dies, die vorherrschende Kultur des Mehr, Besser, Schneller zu hinterfragen. Wir müssen uns stark machen für das, was das eigene Denken und die eigene Entwicklung unterstützt und was dem Verhältnis zu unseren Kindern, Lebenspartnern und dem weiteren sozialen Umfeld guttut. Was die Roboter angeht, so werden die Menschen hoffentlich begreifen, dass wir in Wahrheit von uns selbst enttäuscht sind. Mich macht das richtig wütend. Letztlich wollen wir damit ja anderen keine Gespräche und keine Gesellschaft mehr bieten. Das ist die wahre Rechtfertigung für die Unterhaltung mit einem Roboter, von dem man genau weiß, dass er von der »Unterhaltung« kein einziges Wort versteht. Wir lassen einander im Stich. Es geht nicht um die Roboter, sondern um uns.

Wer wird den Zug anhalten, in dem wir sitzen?

TURKLE: Vorsichtig optimistisch stimmen mich vor allem jene jungen Menschen, die mit dieser Technologie aufgewachsen sind, sich davon aber nicht völlig vereinnahmen lassen – die sagen: »Moment mal!« Sie merken, wie dergleichen das Leben in der Schule und mit den Eltern stört. Ich könnte viele Beispiele nennen, wo ein Kind mit Vater oder Mutter redet, ein Thema aufkommt und der Erwachsene es sofort online recherchiert, doch das Kind protestiert: »Lass das, Papa, nicht googeln, ich will doch nur mit dir reden.« Im Park beobachte ich, wie Kinder oben vom Spielturn rufen: »Mama, guck mal!« Aber die Mama guckt auf ihr Handy und reagiert nicht. Fünf- und Achtjährige wehren sich, wenn sie so ignoriert werden. Und mit 13 oder 15 Jahren werden diese Kinder nachdenklich. Wenn ich sie befrage, sagen sie: »So wie das bei mir war, möchte ich meine Kinder nicht großziehen.« Sie wollen Regeln aufstellen, beispielsweise kein Handy am Esstisch. Ich erkenne auch, dass sich für diese Kids manches an den Technologien wie Arbeit anfühlt – dass man etwa sein Facebook-Profil ständig auf dem neuesten Stand halten muss. Meines Erachtens kann es sehr gut sein, dass die Kinder uns den Weg zeigen werden. Sie erkennen den Preis, den wir zahlen. Sie denken: »Ich muss auf diese Technik nicht verzichten, aber ich könnte vielleicht etwas klüger damit umgehen.«

Die Fragen stellte **Mark Fischetti**, Redakteur bei »Scientific American«.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1343331

Mehr erfahren. Besser leben.

Nr. 2 | 2015

DIABETES FOCUS

SPEZIAL HAUT
Was die Körperhülle schön und gesund erhält. Hilfe bei Wunden, Pflege & Sonnenschutz

JETZT AM KIOSK

PASTA ITALIANA
Köstliche Nudelrezepte von Mamma zum Sattessen ohne Reue

OSTSEE
Mit Diabetes an der Küste: Hotels, Strände, Wanderwege, Spezialitäten

SCHILDDRÜSE
Fehlfunktionen stören den Blutzucker. Mit Selbst-Test

Stabile Werte:
Forscher erklären den Einfluss der Familie

So hilft der **Partner**

In FOCUS-DIABETES bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten.

Medizin & Forschung: Doppelte Kontrolle. Neue Studien erklären, wie der Partner den Blutzucker beeinflusst.

HAUT SPEZIAL: Was empfindliche Diabetiker-Haut schön und gesund hält. Plus: Selbsttest zum Hauttyp.

Menschen & Geschichten: Nie wieder Martinis? „James Bond“-Darsteller Roger Moore über seinen Diabetes.

Fitness & Bewegung: „Ich krieg jeden fit!“ Trainer Christoph Daum erklärt Motivation und Übungen für Diabetiker.

FOCUS-DIABETES gibt es auch unter Tel. 0180 6 480 1006*, Fax 0180 6 480 1001*, www.focus-diabetes.de

* 0,20 €/Anruf aus dem dt. Festnetz. Mobil max. 0,60 €/Anruf.

AUCH ALS
E-PAPER



Leben, wie ich will. Mit **DIABETES**
FOCUS

GLOBALE ERWÄRMUNG

Sind Inselstaaten akut gefährdet?

Inselnationen wie Kiribati drohen im Ozean zu versinken, weil durch die Erderwärmung der Meeresspiegel steigt. Bisherige Maßnahmen zu ihrer Rettung haben jedoch mehr Schaden angerichtet als Nutzen gebracht. Zudem sind einige Inseln überhaupt nicht gefährdet und könnten auf Grund natürlicher ökologischer Vorgänge sogar wachsen.

Von Simon D. Donner



INSTITUTE / CLAIRE MARTINE



Drei Tage vor dem Ende einer langen Forschungsreise um die halbe Welt konnte ich endlich beobachten, wofür ich die ganze Zeit händeringend spektakuläre Belege gesucht hatte: den Anstieg des Meeresspiegels. Ein starker Nordwestwind wehte über die sonst eher stille Lagune von Tarawa, dem Hauptatoll des pazifischen Inselstaats Kiribati (Kiribas gesprochen), der heute stellvertretend für all die Orte steht, die als Folge der vom Menschen verursachten globalen Erwärmung möglicherweise überflutet werden. An jenem Nachmittag schwäpften bei Tidehochwasser die Wellen über die Ufermauern, überschwemmten Straßen und setzten Häuser auf den dicht besiedelten Südinseln Tarawas unter Wasser.

Wie alle auswärtigen Besucher, die am Bonriki International Airport eintreffen und denen die aufregende Landung auf einer beängstigend kurzen, von Küste zu Küste reichen den Piste noch in den Knochen steckt, rechnete ich mit direkt sichtbaren Auswirkungen des Klimawandels in dem abgelegenen Entwicklungsland, wo es an Geld und Knowhow für Anpassungsmaßnahmen fehlt. Das Hochwasser schien meine Befürchtung zu bestätigen. In diesem Monat stand der Gezeitenpegel erstmals mehr als drei Meter über Normalnull. Die Zukunft warf ihre bedrohlichen Schatten voraus.

Das war im Jahr 2005. Seither kehre ich regelmäßig nach Kiribati zurück, um zu erforschen, wie die Inseln und ihre Bevölkerung sich den Veränderungen in Atmosphäre und Ozean anpassen – oder auch nicht. In diesen zehn Jahren gelangte das Land, das anfangs nicht einmal in der Datenbank meines Reisebüros aufgeführt war, zu internationaler Berühmtheit. Doch der Gezeitenpegel hat nie wieder die Dreimetermarke erreicht.

Man sollte sich allerdings nicht täuschen lassen: Kiribati und andere Inselstaaten wie Tuvalu, die Marshallinseln und die Malediven sind zweifellos durch den Anstieg des Meeresspiegels bedroht. Und so ist es durchaus zu begrüßen, dass Menschen überall auf der Welt inzwischen Anteil an ihrem Schicksal nehmen und bereit sind, Geld für ihre »Rettung«

zu spenden. Doch nach meinen Erfahrungen waren viele der bisherigen internationalen Initiativen zur Sicherung der Zukunft Kiribatis schlecht durchdacht, weil sie eher auf Bauchgefühlen und politischen Erwägungen als auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhten. Letztlich haben sie deshalb mehr Schaden angerichtet als Nutzen gestiftet.

Ich habe mit den Menschen in Kiribati zusammen gearbeitet, ihre Geschichten gehört, ihre Bräuche kennen gelernt, bin von ihren Ahnen gesegnet worden, musste bei gemeinschaftlichen Zusammenkünften im Schneidersitz auf einer Matte ausharren, habe alle Sorten lokaler Meeresfrüchte gegessen, wie Professor Hinkley aus der amerikanischen TV-Serie »Gilligans Insel« Tauchausrüstung ohne Werkzeuge repariert und eine Infektion mit dem Denguefeieber überstanden. All dies und meine Analysen der örtlichen Klimamuster und Meeresspiegelstände haben mich mehr über die echten Herausforderungen gelehrt, als sich aus der Ferne in Erfahrung bringen lässt. Und so viel kann ich sagen: Es ist nicht nötig, die Inseln schnellstmöglich durch Deiche zu schützen oder alle Bewohner zu evakuieren. Stattdessen benötigen die Menschen in Kiribati und auf anderen tief gelegenen Archipelen gut durchdachte, an die jeweilige Situation angepasste Pläne und kontinuierliche internationale Hilfe – keine überstürzten, kurz-sichtigen Lösungen, die dem Rest der Welt ein gutes Gefühl vermitteln, die Inselbewohner aber in die Rolle unmündiger Opfer drängen.

Kiribati scheint in der Tat das Paradebeispiel eines vom Meeresspiegelanstieg bedrohten Inselstaats zu sein. Das Land liegt mitten im Pazifischen Ozean. Durch sein Staatsgebiet verlaufen sowohl der Äquator als auch der 180. Längengrad, der 1884 als internationale Datumsgrenze festgelegt wurde. Allerdings macht diese Grenze seit 1995 einen Bogen um Kiribati: Im Interesse eines einheitlichen Datums im Land wurde sie stellenweise ein Stück nach Osten verlegt.

Würde man die Kiribatiinseln zusammenschieben, so nähmen sie nur knapp die Fläche von Berlin ein. Sie verteilen sich jedoch über ein Meeresgebiet von der Größe Indi-

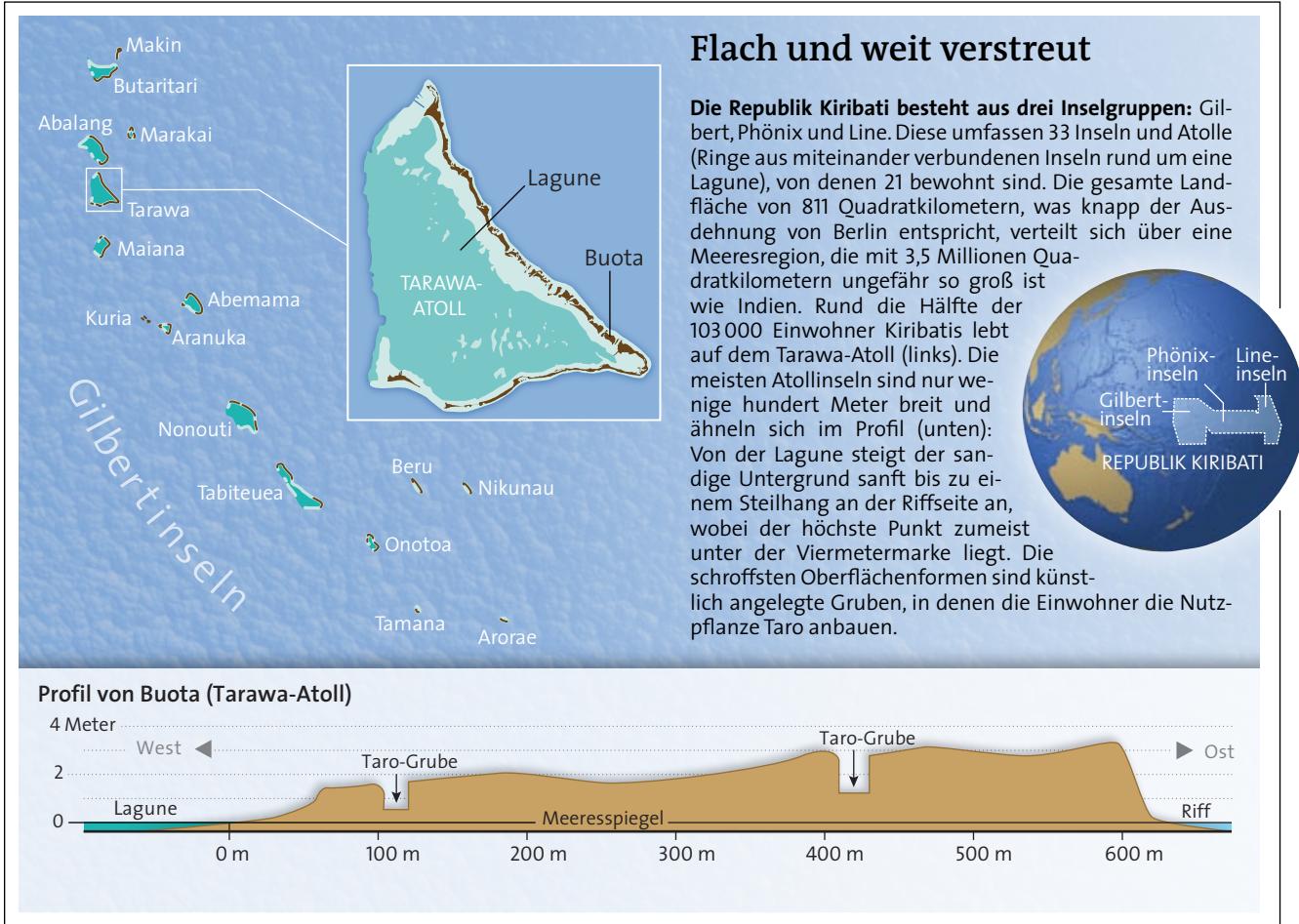


GETTY IMAGES / JUSTIN MCMANUS

Die Bewohner Kiribatis haben gelernt, sich in Eigeninitiative auf vielerlei Weise an steigende Wassерpegel anzupassen. Hier reparieren eine Frau und ihr Sohn den selbst erbauten Deich (links), während ein Mann sein Haus auf Pfählen gebaut hat (unten).



GETTY IMAGES / JUSTIN MCMANUS



ens. Zwei Drittel der Landfläche der Gilbertinseln, wo die meisten der 103 000 Einwohner Kiribatis leben, liegen weniger als zwei Meter über dem Meeresspiegel. Das Land ist weithin so schmal, dass jemand, der am Rand einer stillen Lagune steht, die Brandung auf der anderen Seite hinter sich hören kann.

Ein hoher Geburtenüberschuss und das lokal begrenzte Arbeitsangebot haben zur Konzentration der Hälfte der Bevölkerung auf Südtarawa geführt. Auf dieser Inselkette innerhalb der Gilbertgruppe stehen Wohnhäuser und Regierungsgebäude dicht an dicht, umgeben von Trümmern aus dem Zweiten Weltkrieg, Bauschutt und Mülldenponien. Mangel herrscht dagegen an intakten Wasserleitungen oder Toiletten.

Kein Wunder, dass die Weltbank, als sie rund um den Globus nach dem »verletzlichsten« Staat für ein Demonstrationsprojekt zur Anpassung an den Klimawandel suchte, auf Kiribati kam. Heute erhält das dortige Präsidialamt nach Aussage seines Kommunikationsbeauftragten Rimon Rimon bis zu fünf Presseanfragen pro Woche von »i-Matang« (Ausländern), die eine Geschichte über ein Land erzählen möchten, das verzweifelt gegen den Anstieg des Meeresspiegels kämpft.

Kiribati wird jedoch nicht einfach vom Meer verschluckt. Die Zukunft von Korallenriffinseln vorherzusagen, ähnelt dem Versuch, die Entwicklung eines Bankkontos anhand der allmonatlichen Auszügen abzuschätzen. Man darf dabei nicht

nur auf die Abhebungen schauen – in diesem Fall also den Verlust von Land durch Überflutung und Erosion –, sondern muss auch die eingehenden Beträge im Auge behalten. An einigen Stellen dehnen sich die Inseln nämlich aus. Außerdem lässt sich ein Teil der Überflutungen in Kiribati nicht dem Meeresspiegelanstieg zuschreiben, zumindest noch nicht.

Wandernder Sand

Atolle sind lebende Gebilde, die wachsen können. Als ringförmige Ketten schmaler Riffinseln gehören sie zu den jüngsten Oberflächenformen der Erde. An der Küste Kaliforniens stehen Mammutbäume, die älter sind als die meisten Landflächen von Kiribati.

Unser Verständnis von Koralleninseln geht zurück auf eine bemerkenswerte Erkenntnis, die Charles Darwin (1809–1882) schon vor 180 Jahren hatte. Während seiner Reise auf der »Beagle« rund um die Welt kam der spätere Schöpfer der Evolutionslehre zu dem Schluss, dass Atolle das Produkt sonnenhungriger Korallenriffe seien, die an den Hängen absinkender Vulkane wachsen. Den zufälligen Beweis für seine Theorie lieferten über 100 Jahre später amerikanische Wissenschaftler, die als Vorbereitung für unterirdische Kernwaffentests in den 1950er Jahren Bohrungen in das Eniwetok-Atoll der Marshallinseln vornahmen. Dabei entdeckten sie mehrere tausend Meter unter dem Kalkstein des Riffs einen vulkanischen Sockel.

Die heutigen Atolle haben sich über einen langen Zeitraum aufgebaut. Während der letzten Eiszeit ragten ihre Vorfäder knapp über den damals viel niedrigeren Meeresspiegel. Dieser begann mit dem Abschmelzen des Eises zu steigen, so dass die Inseln überflutet wurden. Neue Korallen hielten jedoch mit dem Wasseranstieg Schritt, indem sie auf dem Kalkgerüst ihrer Vorgänger wuchsen, das zum Riffgestein wurde. Teile der jungen Riffe durchstießen schließlich die Meeresoberfläche, wobei die Korallen abstarben. Obwohl biologisch tot, blieben diese aufgetauchten Strukturen im geologischen Sinn lebendig. Sie fingen Sand und weiteres Material ein, das von den Unterwasserriffen in der Umgebung abbrach und angespült wurde. Strände verbreiterten sich, Wind lagerierte Samen ab, und Pflanzen wuchsen. So entstanden mit der Zeit die Atollinseln als Ansammlungen von Kies und anderen

Sedimenten an der Spitze eines längst abgestorbenen Korallenriffs.

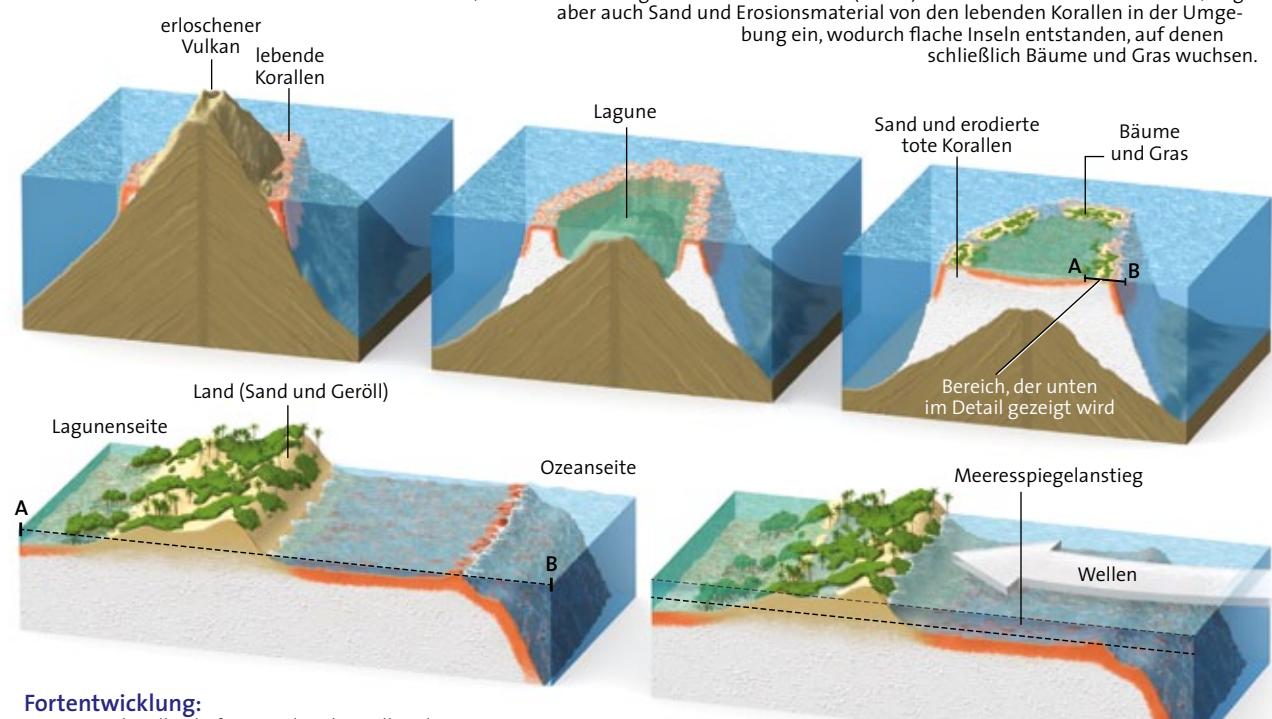
Bis vor Kurzem herrschte die Ansicht, das Verlanden hätte in einer Phase leichten Meeresspiegelrückgangs während der heutigen Warmzeit stattgefunden. In den letzten 20 Jahren fanden Geologen wie Paul S. Kench von der University of Auckland (Neuseeland) jedoch Indizien, wonach einige Atolle schon die Oberfläche durchstießen, als der Meeresspiegel noch anstieg. Conrad Neumann von der University of North Carolina in Chapel Hill und Ian MacIntyre von der Smithsonian Institution in der US-Hauptstadt Washington weisen ferner darauf hin, dass Riffinseln bei zunehmenden Wassersständen nicht zwangsläufig überflutet werden. Ihr Schicksal hängt vom Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs und der Sedimentablagerung ab.

Aufstieg und Untergang von Atollen

Die Inseln eines Atolls sind dynamische Gebilde, die sich innerhalb weniger Jahrhunderte deutlich verändern können. Meereströmungen lagern Sedimente an oder spülen Erdreich ab. Dadurch kommt es vor, dass eine Insel sich auf Kosten einer be-

nachbarten vergrößert. Durch vermeintlich harmlose Eingriffe wie das Errichten eines Anlegestegs oder einer Mole kann sich das natürliche Gleichgewicht in unvorhersehbarer Weise verschieben.

Entstehung: Während der Eiszeit begannen vor vielen Jahrtausenden von Sonnenlicht abhängige Korallen Riffe auf einem erloschenen Vulkan mitten im Ozean zu bauen (links). Der Gesteinskegel erodierte allmählich (Mitte), und abschmelzende Gletscher ließen nach dem Ende der Kältephase den Meeresspiegel ansteigen. Die lichthungrigen Korallen wuchsen, dem zunehmenden Wasserstand folgend, auf ihren Kalkskeletten nach oben und bildeten einen Ring um eine Lagune. Als sich der Meeresspiegel stabilisierte, durchbrachen einige die Wasseroberfläche (rechts). An der freien Luft starben sie ab, fingen aber auch Sand und Erosionsmaterial von den lebenden Korallen in der Umgebung ein, wodurch flache Inseln entstanden, auf denen schließlich Bäume und Gras wuchsen.



Fortentwicklung:

Stürme und Wellen liefern Sand und Geröll und bauen so einen Wall an der Meeseite der Insel auf (links). Menschen lassen sich im Innern nieder, geschützt durch den Wall und nahe am Grundwasser. Zur Lagune hin bleibt die Insel flacher. Wenn der Meeresspiegel steigt (rechts), besteht die Gefahr, dass Wellen den Wall zerstören und die Lagune überfluten. Dabei wird das Grundwasser versalzen und die Vegetation vernichtet. Erfolgt der Anstieg allmählich, kann das sich ansammeln - de Sediment aus Sand und Geröll schnell genug neues Land aufbauen, um mitzuhalten. Bei raschem Anstieg wird die Insel hingegen schließlich zerteilt oder versinkt in den Fluten.



Eindringendes Meerwasser, das in den sandigen Untergrund sickert, kann Kokospalmen zum Absterben bringen (links), Süßwasserbrunnen versalzen (Mitte) und Taro schädigen, eine wichtige Nahrungspflanze mit essbaren Wurzeln und Blättern, die in Gruben angebaut wird (rechts).

Aus diesem Grund lässt sich die künftige Entwicklung von Kiribati kaum vorhersehen. Wegen unterschiedlicher Meeresströmungen, der Lage umliegender Riffe und der relativen Orientierung diverser Küstenlinien kann es passieren, dass durch das bloße Errichten einer einfachen Hafenmole in einem Atoll eine Insel Land einbüsst, während ihr Nachbar oder gar sie selbst an der gegenüberliegenden Küste wächst. Die Vorgänge variieren von Jahr zu Jahr mit dem natürlichen Auf und Ab des Ozeans. Einige Inseln von Kiribati schrumpfen, doch andere scheinen sich zu vergrößern.

Nicht nur wegen des Wachstumspotenzials der Korallenriffe besteht bisher kein Grund zur Panik. Im Widerspruch zu dem Bild, das die Medien zeichnen, hat der Meeresspiegelanstieg vorerst zu keiner dauerhaften Hochwassergefahr in Kiribati, Tuvalu oder irgendeinem anderen Atollstaat geführt. Der Klimawandel macht Extremereignisse wie Hochwasser zwar wahrscheinlicher. Doch die örtliche Höhe des Meeresspiegels zu einem bestimmten Zeitpunkt hängt weiterhin hauptsächlich von den natürlichen Gezeitenvariationen, dem Wetter und der großräumigen Dynamik des Ozeans ab.

Nirgendwo zeigt sich diese Variabilität deutlicher als in Kiribati. Als einziges Land liegt es komplett im Bereich von El Niño, einer Wechselwirkung zwischen dem Pazifischen Ozean und der Atmosphäre, welche die Wetterverhältnisse alle paar Jahre auf den Kopf stellt. Dann verlagern sich die äquatorialen Winde und Strömungen derart, dass sich das Meer rund um Kiribati hebt. Beim Höchststand des El-Niño-Ereignisses von 1997 lag der Meeresspiegel in Tarawa um 45 Zentimeter über dem Tiefststand seiner Gegenspielerin La Niña im folgenden Jahr. Das entspricht der Höhe eines Hügels auf der flachen Insel.

Bei der Rekordflut, die ich während meines Besuchs 2005 beobachtete, trafen El Niño, ein Tiefdrucksystem, das Wasser in Richtung Tarawa drückte, und das übliche Jahreshochwasser zusammen. Auch der Anstieg des Meeresspiegels war beteiligt, aber nur als ein Faktor unter vielen. El Niño, das Wetter und die Gezeiten machen es schwer, seinen genauen Anteil zu bestimmen.

Mag sein Beitrag derzeit noch gering sein, so ist der Meeresspiegel doch auf dem besten Weg, zum Hauptschuldigen bei künftigen Überflutungen zu werden. Leider verwischt angesichts des übertriebenen Eifers, vom Klimawandel betroffene Menschen und Orte zu finden, die Grenze zwischen dem, was ein Meeresspiegelanstieg ist oder nur wie einer aussieht.

Tendenziöse Berichterstattung

Die Medien vermitteln den Eindruck, Kiribati sei am Versinken, weil sie die Fakten einseitig wiedergeben. Fast jede Story über die Inseln bringt ein Foto oder Video von Bikenikoura, einem schmalen Sandstreifen mit Küstenmangrovenwald, der bei Hochwasserständen teilweise überflutet wird. Dorthin schickt die mit Anfragen überhäufte Regierung von Kiribati all die vielen Journalisten und Amtsinhaber wie UNO-Generalsekretär Ban Ki-Moon, die den Anstieg des Meeresspiegels »sehen« wollen. »Es ist unser Vorzeigeobjekt«, sagt Rimon. Die Besucher beobachten, wie das Wasser in die »maneaba«, die Versammlungshütte der dortigen Gemeinde, kriecht, und kehren zurück mit der Geschichte von einem Land, das vom Meer verschluckt wird.

Bikenikoura, auch »goldener Strand« genannt, ist jedoch keineswegs repräsentativ für die gesamte Region. Als sich die »World Assemblies of God Fellowship«, eine internationale Organisation pfingstlerischer Freikirchen, nach einem Siedlungsplatz für Zuzügler von den äußeren Inseln umsah, die auf Arbeitssuche nach Südtarawa kamen, musste sie sich mit diesem ungünstigen Flecken begnügen, da Grund und Boden in der boomenden Region knapp und entsprechend teuer ist. Wie in vielen Entwicklungsländern treiben Überbevölkerung und ökonomischer Druck die Menschen aus sicheren, aber entlegenen Regionen in verwundbarere Wohngebiete in der Nähe des Bevölkerungszentrums. Das Ufer der Lagune von Südtarawa ist geprägt von zerbrochenen Dämmen und überflutetem Marschland. Doch dabei handelt es sich eher um das Erbe fehlgeschlagener Landgewinnungsmaßnahmen als um Folgen des Meeresspiegelanstiegs.

Tebunginako, das andere Aushängeschild für Katastrophentouristen, beruht auf einem ähnlichen Missverständnis. Die Überflutung dort ist eine unglückliche Auswirkung der natürlichen Blockade eines Kanals zwischen Lagune und Ozean, die sich schon vor Generationen ereignete – höchstwahrscheinlich bei einem Sturm, wie eine Analyse durch die Applied Geoscience and Technology Division (AGTD) der Pazifischen Gemeinschaft (Secretariat of the Pacific Community, SPC) ergab. Der alte Name für das Land um den Ort Tebunginako ist Terawabono, was »verstopfter Kanal« bedeutet.

Überflutungen an Stellen wie Bikenikoura und Tebunginako schreiben wir wegen unserer Erwartungen fälschlich dem Meeresspiegelanstieg zu. In der volkstümlichen Südseeromantik – genährt von Abenteuerromanen, den Bildern eines Paul Gauguin und Reiseprospekten, aber auch verkörpert im Kitsch der örtlichen »Tiki-Bar« – hält sich das Stereotyp idyllischer Inseln voller einfacher Strohhütten. Vor diesem Hintergrund festigen Stippvisiten von nur einer Woche mit dem ausdrücklichen Zweck, die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs zu dokumentieren, in einer Art interkulturnellen Rückkopplungsschleife das Klischee vom verletzlichen, untergehenden Paradies.

Ein Europäer oder Nordamerikaner, der nach Kiribati reist, könnte genauso gut durch ein Wurmloch in ein anderes Universum treten. Seine naive Unbedarftheit in Kombination mit dem zurückhaltenden Wesen der Inselbewohner, der Sitte, auf Außenstehende einzugehen, sowie der Altlast unzähliger vorangegangener i-Matang, die nach dem Klimawandel gefragt haben, macht aus einem Ort, der auf Grund natürlicher Vorgänge überflutet ist, im Handumdrehen ein Menetekel der Erderwärmung – zumal es keine einheimischen Wissenschaftler gibt, welche die Aussagen überprüfen könnten. Hinzu kommt als geopolitischer Aspekt das legitime Bedürfnis eines winzigen, auf der Weltbühne kaum vertretenen Landes, sich Aufmerksamkeit für seine bedrohte Existenz zu verschaffen. Da ist die Versuchung zu übertreiben groß.

Überraschendes Wachstum

Doch Übertreibung, auch wenn sie in bester Absicht geschieht, ruft irgendwann unweigerlich Widerspruch hervor und kann das Pendel in die entgegengesetzte Richtung ausschlagen lassen. Zu einem solchen Umschwung kam es 2010,

als Kench gemeinsam mit seinem Kollegen Arthur Webb, der damals als Experte für Küstengeologie bei der Applied Geoscience and Technology Division der SPC tätig war, in einem Artikel in der Zeitschrift »Global and Planetary Change« berichtete, dass sich 23 von 27 Atollinseln in Kiribati, Tuvalu und den Föderierten Staaten von Mikronesien, von denen jeweils ältere Luftbilder existierten, in den Jahrzehnten zuvor entweder ausgedehnt hatten oder stabil geblieben waren. Für die meisten Inselstaaten existieren keine solchen historischen Daten. Allerdings wurden ähnliche Ergebnisse inzwischen für Atolle in Französisch-Polynesien präsentiert.

Demnach hatten – bisher zumindest – Meeresströmungen, Sedimentanspülungen und ähnliche Vorgänge größeren Einfluss auf die Landfläche der Inseln als der Anstieg des Meeresspiegels. Wie Kench und Webb in ihrem Artikel anmerken, ist die unerschlossene Insel Buariki in Nordtarawa seit 1943 dank natürlicher Ablagerungen am Lagunenufer um zwei Prozent gewachsen. Noch wesentlich stärker haben sich Inseln mit hoch entwickelter Infrastruktur ausgedehnt – in vielen Fällen als unabsichtliche Folge menschlicher Aktivitäten. So blockierten Fahrdämme zwischen den Inseln in Süd tarawa jahrelang die Wasserströmung und leiteten Sand aus der Lagune zurück zu dicht bevölkerten Eilanden wie der Hauptinsel Bairiki, die sich seit 1969 um 16 Prozent vergrößert hat.

Unklar bleibt allerdings, ob die Inseln auch höher geworden sind und ob sie sich bei stärker steigendem Meeresspiegel immer noch ausdehnen werden. Desgleichen ist offen, ob sie weiterhin in der Lage sind, ausreichend Süßwasser für Menschen und Pflanzen zu speichern. Natürlich können Inseln auch erodieren, was beim Blick von der Küste des betriebsamen Bairiki zum unbewohnten Laguneneiland Bikeman deutlich wird. Derselbe Fahrdamm, der Bairiki wachsen ließ, beraubte Bikeman, das auf Karten aus der britischen Kolonialzeit als grüner Fleck verzeichnet ist, seiner Sedimentzufuhr. Heute ist davon nur noch eine mehrfach durchbrochene, bei Hochwasser kaum mehr zu erkennende Sandbank übrig.

Leider ist die politisch aufgeheizte öffentliche Debatte über den Klimawandel weniger differenziert als die wissenschaftliche Erörterung des Sachverhalts. Nach der Veröffentlichung des Artikels von Webb und Kench gab es höhnische Schlagzeilen über die früheren Warnungen vor dem drohenden Untergang von Kiribati und anderen Atollstaaten. Die Frage, welche aktuellen Auswirkungen der Anstieg des Meeresspiegels auf die Inseln hat, ist seither zum Gegenstand eines ideologisch gefärbten Tauziehens geworden. Kiribatis Präsident Anote Tong spricht ebenso wie viele Aktivisten weiterhin von einer akuten Bedrohung, während ihm in- und ausländische Kritiker unterstellen, damit nur internationale Aufmerksamkeit und finanzielle Zuwendungen erlangen zu wollen.

Als gute Nachricht lässt sich festhalten, dass die Dynamik von Riffinseln Ländern wie Kiribati einen Aufschub gewährt – um mindestens einige Jahrzehnte, die sich für Anpassungs-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



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



Der in den 1970er Jahren errichtete Fahrdamm zwischen den beiden kleinen Inseln Betio und Bairiki hatte unvorhergesehene Auswirkungen: Indem er Meereströmungen mit ihrem Gehalt an Sediment blockierte und umleitete, ließ er Bairiki wachsen, während eine Nachbarinsel schrumpfte.

maßnahmen statt dem Schmieden von Evakuierungsplänen nutzen lassen. Das fatale Gerede über rasch untergehende Inseln wirkt dabei nur kontraproduktiv. Gilt ein Ort erst einmal als Demonstrationsobjekt für das verhängnisvolle Wirken des Klimawandels, kommt er aus dieser Rolle nicht mehr heraus, meint meine Kollegin Sophie Webber, Doktorandin in Geografie an der University of British Columbia (Kanada). Das ist wie in Fernsehserien: Wer eine Figur zu lange spielt, riskiert, mit ihr gleichgesetzt zu werden.

Kiribati ist zweifellos gefährdet. Doch diese Bedrohung übermäßig zu betonen, birgt die Gefahr, seine Vitalität zu untergraben. Zum Beispiel sind die Einwohner der zur Dürre neigenden südlichen Gilbertinseln für ihre hohe Arbeitsmoral und ihren Gemeinschaftssinn in ganz Kiribati berühmt. Als aber auf einer dieser Inseln, in der Gemeinde Beru, vor einigen Jahren das Brunnenwasser versalzte, warfen die Menschen sofort die Flinte ins Korn und gaben dem Klimawandel die Schuld. Niemand kam auf die Idee, zu prüfen, ob vielleicht die neuen, mit Solarzellen als Energiequelle ausgestatteten Wasserpumpen, die eine Hilfsorganisation als Ersatz für die alten brennstoffbetriebenen zur Verfügung gestellt hatte, verantwortlich sein könnten. Tatsächlich waren sie, wie ein örtlicher Berater später herausfand, den ganzen Tag über in Betrieb gewesen, weil kein Treibstoff benötigt wurde, und hatten so das Grundwasser aufgebraucht. Das Problem wurde behoben, doch der Vorfall veranschaulicht die Kehrseite der gut gemeinten Rettungsinitiativen aus dem Ausland. Das Gerede von einer globalen Gefährdung kann Menschen, die sich normalerweise selbst zu helfen wissen, dazu verleiten, die Welt für ihre Probleme verantwortlich zu machen, statt sie beherzt anzupacken.

Da die Bedrohung im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit steht, tummeln sich sowohl die internationale Presse als auch die Regierung des Inselstaats gern auf publikumswirk-

samen Nebenschauplätzen, wo es eher um Effekthascherei als um konkrete Verbesserungen vor Ort geht. So machte ein Mann aus Kiribati Schlagzeilen, der nach Ablauf seines Visums in Neuseeland Asyl beantragte, weil seine Heimat durch den Klimawandel bedroht sei. In Wirklichkeit suchte er nur einen Vorwand, nicht nach Hause zurückkehren zu müssen. Als die Regierung von Kiribati kürzlich in Fidschi Land erwarb, werteten Nachrichtenagenturen das als vorsorgliche Beschaffung eines Zufluchtsorts für Staatsangehörige, denen die Evakuierung droht. Tatsächlich handelte es sich um die strittige Verwendung von Steuermitteln für den Kauf einer ehemaligen Kokosplantage zur Nahrungsmittelproduktion. Gegner von Präsident Tong kritisierten die Aktion als puren Werbegag.

Die wirklich wirksamen Maßnahmen werden unspektakulär, mühsam und aufwändig sein. Vor allem erfordern sie einen langen Atem. Hektischer Aktionismus wie Landkäufe oder punktuelle Hilfsprojekte bringen nichts. Erfolg versprechen nur dauerhafte Vorhaben, die auf die speziellen örtlichen Gegebenheiten zugeschnitten sind und in einem schwierigen Lernprozess mittels Versuch und Irrtum optimiert werden. Dazu bedarf es langfristiger Investitionen der internationalen Gemeinschaft.

Eine solche Initiative ist das von der Weltbank und anderen Organisationen finanzierte Kiribati Adaptation Program. Dabei hat sich gezeigt, wie schwierig die nachhaltige Anpassung an den Klimawandel ist. Acht lange Jahre verstrichen mit Beratungen und Schulungen sowie mit dem Entwerfen von Strategien und dem Identifizieren vorrangiger Probleme, bis schließlich 2011 erste konkrete Maßnahmen anliefen: Man errichtete Deiche an verschiedenen Stellen, darunter an der Spitze einer Flughafenlandebahn, baute ein Vorzeigedorf und konstruierte Teile von zwei Fahrdämmen. Von den Geldgebern, der Regierung von Kiribati und der Öffent-

lichkeit unter Handlungsdruck gesetzt, entschieden sich die Projektleiter und die internationalen Bauunternehmer für ein einfaches Design, das die lokalen Behörden in Zukunft leicht übernehmen könnten. Doch bei dieser Kompromisslösung missachteten sie den Rat von Küstenschützern und verzichteten auf teure Vorkehrungen zur Verringerung der Wellenenergie und Verhütung von Erosion.

Die Folgen waren verheerend: Schon nach wenigen Monaten hatte die Brandung die Enden der Deiche schwer beschädigt und an einer Stelle sogar die Trinkwasserleitung von Süd tarawa freigespült. Vorwürfe richteten sich sowohl gegen die Bauunternehmer wegen Konstruktionsmängeln als auch gegen die Weltbank und die internationalen Geldgeber wegen rigider Vorgaben und Erwartungen sowie gegen die Projektleiter und die Regierung von Kiribati, weil sie die Risiken falsch eingeschätzt hätten.

Doch vielleicht lässt sich der Reinfall noch in einen Erfolg ummünzen. Projektmitarbeiter reparieren inzwischen die Deiche, wobei sie ihnen ein flacheres Profil geben und sie be pflanzen, um sie robuster gegen die auftreffenden Brecher zu machen. Leitende Ingenieure modifizieren ihre Pläne. Die Anpassung an den Klimawandel in einer Region wie Kiribati erfordert eine kontinuierliche Investition in die Ausbildung einheimischer Wissenschaftler und Techniker und das Lernen aus Fehlern.

Eine Zukunft in Würde

Zwar können Riffinseln unter Umständen wachsen und Deiche einen gewissen Schutz bieten. Doch all das wird Kiribati nicht auf Dauer retten, wenn es nicht gelingt, die weltweite Emission von Treibhausgasen zu senken. Falls deren Ausstoß weiter im gleichen Maße zunimmt wie bisher, sollte der Meeresspiegel gemäß den Projektionen von Klimamodellen gegen Ende dieses Jahrhunderts fünfmal so schnell ansteigen wie heute. Selbst unter der optimistischen Annahme, dass die Inseln weiterhin mit der heutigen Nettorate Material anlagern, dürften sie unter diesen Umständen schmäler und steiler werden und eine geringere Speicherkapazität für Süßwasser haben, so dass es zu teuer würde, sie weiterhin zu bewohnen.

Abgesehen davon wäre das Höhenwachstum synchron zum Anstieg des Meeresspiegels auch keine sinnvolle Option für hochgradig erschlossene Inseln wie Tarawa oder Malé, die dicht besiedelte Hauptinsel der Malediven. Früher einmal, als die Bewohner ihre wenig robusten Strohhütten etwa alle zehn Jahre erneuern mussten, weil sie allmählich verrotteten, war es noch möglich, mit den Änderungen der Topografie Schritt zu halten. Moderne Gebäude, Straßen, Krankenhäuser und Häfen sind nicht so flexibel. Entweder verhindern sie ein potenzielles Wachstum der Inseln durch Sand und Kies, die sich ansammeln, oder sie müssten regelmäßig verlegt werden, was extrem kostspielig wäre.

Unrealistisch mutet auch die Erwartung an, die Bewohner könnten einfach auf weniger erschlossene äußere Inseln umziehen, etwa auf das größere und trockenere Kiritimati mehr-

rere tausend Kilometer östlich von Tarawa, denn dazu müssten sie eine hoch entwickelte Infrastruktur aufgeben und sie anderswo komplett neu aufbauen.

Vor diesem Hintergrund hat Kiribati die Initiative »Migration with Dignity« (Migration in Würde) gestartet. Sie richtet sich an Länder mit alternder Bevölkerung wie Australien, die der Jugend von Kiribati einen Platz anbieten könnten, an dem ihre Arbeitskraft gebraucht wird. Falls der Inselstaat eines Tages aufgegeben werden müsste, hätten seine Bewohner so die Chance, sich bereits existierenden Auswanderergemeinden anzuschließen, was ihre Integration wesentlich erleichtern würde.

Die Initiative gemahnt daran, dass die Menschen von Kiribati als Leidtragende des Klimawandels mehr als nur Geld und Aufmerksamkeit benötigen. Wir schulden ihnen Respekt. Es ist entwürdigend, den Inselstaat zum bloßen Anschauungsobjekt in der Debatte über den Klimawandel zu degradieren (»Wir müssen die Emissionen vermindern, um diese ertrinkenden Inselbewohner zu retten«) oder sie als Adressaten von aufgedrängten Vorzeigeprojekten einer Organisation zu missbrauchen, die sich in Sachen Erderwärmung profilieren möchte.

Obwohl gut gemeint, führen übertriebene Berichte und hektische Hilfsaktionen eher zur Vergeudung von Zeit und Ressourcen für nutzlose Ideen und vergebliche Anstrengungen, als dass sie dazu beitragen, die Kompetenzen, langfristigen Managementstrategien und dauerhaften Projekte zu entwickeln, die zur Vorbereitung auf eine ungewisse Zukunft nötig wären. Als ich 2005 nach Kiribati reiste, hielt ich drei Wochen für ausreichend, die Beeinträchtigung des Landes durch den Klimawandel zu verstehen. Zehn Jahre später ringe ich immer noch um dieses Verständnis. ↞

DER AUTOR



Simon D. Donner ist Professor für Geografie an der University of British Columbia (Kanada). Sein Interesse gilt dem Einfluss des Klimas auf Ökosysteme und Gesellschaften. Zehn Jahre lang hat er untersucht, wie sich die globale Erwärmung auf Korallenriffe auswirkt und wie die Bewohner der Pazifikinseln sich dem Wandel am besten anpassen können.

QUELLEN

Donner, S.D.: Sea Level Rise and the Ongoing Battle of Tarawa. In: EOS, Transactions of the American Geophysical Union 93, S. 169–170, 2012

Donner, S.D., Webber, S.: Obstacles to Climate Change Adaptation Decisions: A Case Study of Sea-Level Rise and Coastal Protection Measures in Kiribati. In: Sustainability Science 9, S. 331–345, 2014

Kench, P.S.: Developments in Coral Reef and Reef Island Geomorphology. In: Geomorphology 222, S. 1–2, 2014

Rankey, E.C.: Nature and Stability of Atoll Island Shorelines: Gilbert Island Chain, Kiribati, Equatorial Pacific. In: Sedimentology 58, S. 1831–1859, 2011

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1343335

Ich denke, also bin ich. Glücklich.

Jetzt
im Handel.

GEO WISSEN

Den Menschen verstehen

NR. 55

Zuversicht

Die Kraft des
positiven
Denkens



Auch mit
DVD erhältlich

Test
Wie optimistisch
sind Sie?

Lebensmut
Kann Hoffnung
heilen?

Vergebung
Anderen verzeihen –
und sich selbst helfen

Persönlichkeit
Zur inneren Stärke
finden

Die Folgen der digitalen Transparenz

So paradox es klingt: Die Entwicklung des Lebens im urzeitlichen Ozean kann uns einiges über die Zukunft unserer Gesellschaft lehren. Da im Zeitalter der digitalen Vernetzung kein Geheimnis mehr sicher ist, stehen wir an der Schwelle einer Epoche, die das Verhältnis von Öffentlichkeit und Privatleben ganz neu definieren muss.

Von Daniel C. Dennett und Deb Roy

AUF EINEN BLICK

DIE ZUKUNFT DER VERTRAULICHKEIT

Vor rund 540 Millionen Jahren nahm die Vielfalt der in den uralten Meeren lebenden Organismen enorm zu. Nach einer Hypothese wurde der Evolutions-schub durch die **plötzliche Transparenz der Ozeane** ausgelöst: Weithin sichtbare Tiere waren gezwungen, sich durch **Panzer, Tarnung und Täuschungsmanöver** an die neue Umwelt anzupassen.

2 Diese **kambrische Explosion** hilft beim Verständnis der gesellschaftlichen Veränderungen, welche die **Digitaltechnik** mit sich bringen wird. Wenn Geheimnisse in einem Meer frei zugänglicher Informationen nur schwer zu bewahren sind, müssen Staaten, Firmen und Einzelpersonen **neuartige Datenschutzmechanismen** entwickeln.

3 Die **digitale Transparenz** wird mit der Zeit **völlig neue Organisationsformen** hervorbringen. Auf Dauer haben nur Systeme eine Chance, die sich **schnell und flexibel** an die Erfordernisse des Datenschutzes anpassen können.

ZOHAR LAZAR





Schafft die digitale
Transparenz einen
»gläsernen Bürger«, der
für seine Gedanken-
freiheit neuartigen
Datenschutz benötigt?

Vor rund 543 Millionen Jahren ereignete sich die so genannte kambrische Explosion: eine spektakuläre Häufung biologischer Innovationen. Binnen weniger Millionen Jahre – nach geologischen Maßstäben fast augenblicklich – entwickelten Lebewesen völlig neue Körperformen, neue Organe, neue Strategien für Angriff und Verteidigung. Die Evolutionsbiologen streiten noch über die Ursache dieser erstaunlichen Welle von Neuerungen. Aber eine besonders überzeugende Hypothese des Zoologen Andrew Parker von der University of Oxford besagt, dass Licht der Auslöser war. Parker zufolge wurden damals die seichten Ozeane und die Atmosphäre durch plötzliche chemische Veränderungen viel lichtdurchlässiger. Zu jener Zeit gab es nur in den Meeren tierisches Leben, und sobald Sonnenlicht das Wasser durchdrang, wurde Sehkraft zum entscheidenden Evolutionsvorteil. Zugleich mit der rapiden Entwicklung von Augen entstanden auch entsprechend angepasste Verhaltensformen und weitere körperliche Besonderheiten.

Während zuvor alle Wahrnehmungen nur die nächste Nähe erfassten – durch direkten Kontakt oder durch Gespür für chemische Konzentrationsänderungen oder Druckwellen –, konnten Tiere nun auch entfernte Objekte identifizieren und verfolgen. Raubtiere schwammen gezielt auf ihre Beute zu; diese konnte sehen, dass sich Feinde näherten, und die Flucht ergreifen. Fortbewegung verläuft langsam und unsicher, solange sie nicht von Augen geleitet wird, und Augen sind nutzlos, wenn man sich nicht bewegen kann. Darum entwickelten sich Wahrnehmung und Bewegung parallel. Diese Koevolution war ein Hauptgrund für die Entstehung der heutigen Artenvielfalt.

Parkers Hypothese zur kambrischen Explosion liefert eine ausgezeichnete Vorlage zum Verständnis eines neuen, scheinbar völlig andersartigen Phänomens: der Ausbreitung der Digitaltechnik. Zwar haben Fortschritte der Kommunikationstechnik auch in der Vergangenheit unsere Welt verändert – die Erfindung der Schrift signalisierte das Ende der Vorgeschichte, die Druckerpresse erschütterte die ständische Gesellschaft –, aber die Auswirkungen der Digitaltechnik könnten alles Bisherige in den Schatten stellen. Sie wird die Macht einiger Personen und Organisationen vermehren und andere entmachten; und sie wird Chancen und Risiken mit sich bringen, die noch vor einer Generation unvorstellbar waren.

Durch die sozialen Medien verschafft das Internet dem Einzelnen globale Kommunikationswerkzeuge. Eine digitale Welt ohne etablierte Regeln tut sich auf. Dienste wie YouTube, Facebook, Twitter, Tumblr, Instagram, WhatsApp und SnapChat erzeugen neue Medien, die Telefon und Fernsehen Konkurrenz machen – und die Geschwindigkeit, mit der diese Medien auftauchen, ist atemberaubend. Da Ingenieure Jahrzehnte brauchten, um Telefon- und Fernsehnetze zu entwickeln und einzurichten, hatte die Gesellschaft Zeit, sich anzupassen. Heutzutage kann ein sozialer Dienst binnen Wochen entstehen, und womöglich nutzen ihn binnen Monaten

hunderte Millionen Menschen. Das enorme Innovationstempo gibt Organisationen keine Zeit, sich an ein Medium anzupassen, bevor schon das nächste auftaucht.

Der überstürzte Wandel, den diese Medienflut auslöst, lässt sich in einem Wort zusammenfassen: Transparenz. Wir können jetzt weiter, schneller, billiger und problemloser schauen als jemals zuvor – und auch gesehen werden. Jeder von uns erkennt, dass jeder zu sehen vermag, was wir sehen; wir befinden uns in einem rekursiven Spiegelsaal gegenseitigen Wissens, der zugleich befähigt und behindert. Das uralte Versteckspiel, welches das gesamte Leben auf unserem Planeten geformt hat, verlagert auf einmal sein Spielfeld, seine Ausstattung und seine Regeln. Spieler, die sich nicht anpassen können, werden bald ausscheiden.

Unseren Organisationen und Institutionen stehen tief greifende Veränderungen bevor. Regierungen, Armeen, Kirchen, Universitäten, Banken und Firmen haben sich in einem relativ trüben Erkenntnismilieu entwickelt, in dem das meiste Wissen lokal begrenzt blieb, Geheimnisse leicht bewahrt wurden und der Einzelne kurzsichtig oder sogar blind war. Wenn diese Organisationen plötzlich in hellem Licht stehen, entdecken sie schnell, dass sie sich nicht mehr auf die alten Methoden verlassen können; sie müssen auf die neue Transparenz reagieren oder untergehen. Genau wie eine lebende



Laura Poitras/Praxis Films / CC-BY 3.0 (CREATIVE COMMONS ORGANIZATION BY 3.0) (LEGALCODE)

Der amerikanische Informatiker Edward Snowden informierte die Öffentlichkeit 2013 über streng geheime Unterlagen des US-Geheimdienstes NSA zur Überwachung der weltweiten Internetkommunikation. Er wurde von den USA als Spion angeklagt und hat derzeit Asyl in Russland.

Zelle eine wirksame Membran braucht, um ihre inneren Mechanismen gegen die Wechselfälle der Außenwelt zu schützen, so benötigen soziale Organisationen ein schützendes Interface zwischen ihren inneren Angelegenheiten und der Öffentlichkeit – und die alten Schutzschirme verlieren ihre Wirksamkeit.

Klauen, Kiefer, Panzer

In seinem Buch »In the Blink of an Eye« argumentierte Parker, die äußersten harten Körperteile der Fauna hätten am unmittelbarsten auf den extremen Selektionsdruck der kambrischen Explosion reagiert. Die plötzliche Transparenz der Meere führte zur Entstehung kameraähnlicher Sehorgane, die wiederum eine rasche Anpassung von Klauen, Kiefern, Panzern und schützenden Körperteilen nach sich zogen. Außerdem entwickelten sich Nervensysteme, als manche Tiere begannen, sich als Räuber zu betätigen, während andere zu Flucht und Tarnung übergingen.

Analog können wir erwarten, dass Organisationen auf den digitaltechnisch verursachten Druck der sozialen Transparenz mit Anpassungen ihrer äußersten Körperteile reagieren. Außer den Organen, mit denen diese Außenschicht Güter und Dienstleistungen liefert, enthält sie informationsverarbeitende Elemente zur Kontrolle und Selbsterhaltung, zum Beispiel Abteilungen für Werbung, Marketing und Rechtsfragen. Hier macht sich die Wirkung der Transparenz am direktesten bemerkbar. Durch soziale Netze wandern Gerüchte und Meinungen jetzt in Tagen oder gar Stunden rund um den Erdball. Werbe- und Marketingabteilungen müssen neuerdings »im Gespräch bleiben« – das heißt, auf den einzelnen Kunden nachvollziehbar, ehrlich und flexibel eingehen. Organisationen mit unbeweglichen Rechtsabteilungen, die Wochen oder Monate brauchen, um Kommunikationsstrategien zu entwickeln, werden bald das Nachsehen haben. Alte Gewohnheiten müssen sich ändern, oder die Organisation versagt.

Der leichtere Zugang zu Daten ermöglicht eine neue Form des politischen Kommentars, die sich auf umfassende empirische Beobachtungen stützt. Das demonstrierte der Datenjournalist Nate Silver anlässlich der amerikanischen Präsidentenwahl 2012. Während einige Nachrichtenbüros behaupteten, sie wüssten schon nach ein paar Umfragestichproben, warum ihr Kandidat gewinnen würde, lieferte Silver Analysen, die auf sämtlichen verfügbaren Umfragendaten beruhten. Silver sagte nicht nur die Wahlergebnisse frappierend exakt voraus, sondern zerstreute durch das Veröffentlichen seiner Methodik auch jeden Verdacht, es handle sich bloß um Zufallstreff. Seit transparente Umfragen immer leichter zugänglich werden, haben Nachrichtenagenturen und politische Kommentatoren, die einseitige Geschichten verbreiten, ein immer schwereres Spiel.

Vor einer ähnlichen Herausforderung stehen die Hersteller von Konsumgütern. Nutzerbewertungen von Waren und Dienstleistungen verändern das Machtverhältnis zwischen Kunden und Firmen. Das Etablieren einer Marke wird schwie-

Kleine Gruppen von Menschen werden mit der neuen Transparenz am besten zureckkommen

riger, wenn die Meinung der Konsumenten an Gewicht gewinnt. Flexible Firmen lernen, schnell und öffentlich auf Beschwerden und negative Bewertungen zu reagieren – und falls die Kritik überwiegt, müssen sie das Produkt verändern oder ganz fallen lassen. Es hat keinen Zweck mehr, Geld in die Vermarktung mittelmäßiger Produkte zu stecken.

Kleine Gruppen von Menschen mit gleichen Werten, Überzeugungen und Zielen, die sich im Fall einer Krise mittels ad hoc improvisierten internen Kommunikationskanälen schnell absprechen können, werden mit der neuen Transparenz am besten zureckkommen. Um diese flexiblen Organisationen von großen hierarchisch gegliederten Bürokratien zu unterscheiden, könnte man sie »Adhokratien« nennen. Wenn die Zwänge der wechselseitigen Transparenz weiter wachsen, werden sich vermutlich neuartige Organisationsformen herausbilden, die viel dezentraler arbeiten als heutige. Zudem dürfte der Selektionsdruck kleinere Gebilde favorisieren und Großorganisationen vielleicht überhaupt zum Aussterben verurteilen.

Geheimnisse ohne Dauer

Von Louis D. Brandeis (1856–1941), Richter am Obersten Gerichtshof der USA, stammt der Ausspruch: »Sonnenlicht gilt als das beste Desinfektionsmittel.« Das stimmt sowohl buchstäblich als auch im übertragenen Sinn. Doch Sonnenlicht kann auch gefährlich sein. Töten wir mit unserem Reinigungseifer nicht zu viele nützliche Zellen ab? Laufen wir nicht Gefahr, den Zusammenhalt oder die Wirksamkeit von Organisationen zu zerstören, indem wir ihr Innenleben allzu sehr entblößen?

Brandeis war ein prinzipieller Gegner der Geheimhaltung. Offenbar meinte er, je transparenter eine Institution sei, desto besser. Gut 100 Jahre später kann die von ihm angestoßene Kampagne viele Erfolge vorweisen. Doch trotz aller politischen Phrasen über die segensreichen Vorzüge der Transparenz herrscht in den Zentren der Macht weiterhin Geheimhaltung – und das aus gutem Grund.

Eine biologische Betrachtung macht deutlich, dass Transparenz nicht nur Vorteile hat. Tiere und sogar Pflanzen informieren sich mit ihren Sinnesorganen über die Umgebung und handeln, um ihr Wohlergehen zu mehren. In ähnlicher Weise ist eine menschliche Organisation ein Akteur, der aus zahlreichen tätigen, lebenden Teilen besteht – aus Menschen. Doch anders als pflanzliche oder tierische Zellen haben Menschen vielerlei Interessen und Wahrnehmungsfähigkeiten. Ein vielzelliger Organismus muss nicht befürchten, dass seine Bestandteile von Bord gehen oder eine Meuterei anzetteln; außer im Fall einer Erkrankung sind Zel-

len gelehrige, gehorsame Sklaven. Dagegen verfügen Menschen über individuelle Macht und sind äußerst neugierige Wesen.

Das war nicht immer so. In früheren Zeiten konnten Diktatoren hinter hohen Mauern ganz ungehindert herrschen. Sie verfügten über hierarchische Organisationen aus Funktionären, die sehr wenig von dem System wussten, dem sie angehörten, und noch weniger vom Zustand der Welt, ob nah oder fern. Die Kirchen sind seit jeher besonders geübt darin, die Neugier ihrer Mitglieder zu durchkreuzen; sie liefern ihnen unzureichende oder verzerrte Informationen über den Rest der Welt und hüllen die internen Handlungen, Geschichten, Finanzen und Ziele in geheimnisvollen Nebel. Auch Armeen pflegen ihre Strategien geheim zu halten – und zwar nicht nur vor dem Feind, sondern auch vor der Truppe. Soldaten, welche die mutmaßlichen Opferzahlen einer Operation kennen, werden nicht so gut kämpfen wie diejenigen, die von ihrem wahrscheinlichen Schicksal keine Ahnung haben. Außerdem kann ein unwissender Soldat weniger preisgeben, wenn er in Gefangenschaft gerät.

Eine grundlegende Erkenntnis der Spieltheorie besagt, dass die Akteure Geheimnisse bewahren müssen. Wer einem Mitspieler den eigenen Zustand enthüllt, verliert wertvolle Autonomie und läuft Gefahr, manipuliert zu werden. Um auf einem freien Markt in fairen Wettbewerb zu treten, schützen die Firmen die Rezepte für ihre Produkte, ihre Expansionspläne und andere Unternehmensdaten. Schulen und Universitäten müssen ihre Prüfungsaufgaben bis zum Zeitpunkt des Examens unter Verschluss halten. US-Präsident Barack Obama versprach zwar eine neue Ära der Regierungstransparenz, aber trotz bedeutsamer Verbesserungen herrscht in vielen Bereichen weiterhin strikte Geheimhaltung und Im-

munität. Das soll auch so sein. Beispielsweise müssen Wirtschaftsstatistiken bis zu ihrer offiziellen Verlautbarung geheim bleiben, damit Insider keinen Vorteil daraus ziehen können. Eine Regierung braucht ein Pokerface, um ihre Handlungen auszuführen – aber die neue Transparenz erschwert das mehr als jemals zuvor.

Wie die Enthüllungen Edward Snowdens über die Machenschaften des US-Geheimdienstes National Security Agency (NSA) demonstrieren, kann ein einzelner »Maulwurf« oder Whistleblower eine gewaltige Organisation erheblich stören. Zwar streute Snowden seine Informationen mit Hilfe traditioneller Nachrichtenkanäle, aber erst die verstärkende Resonanz in den sozialen Medien sorgte dafür, dass die öffentliche Aufregung nicht erlahmte, die NSA dauerhaft unter internationalen Druck geriet und die US-Regierung handeln musste.

Die NSA reagiert darauf mit einer drastischen Anpassung ihrer »Außenhaut«. Die bloße Tatsache, dass sie sich öffentlich gegen Snowdens Anschuldigungen verteidigte, war ohne Beispiel für eine Organisation, die lange in völliger Verborgenheit agiert hatte. Sie muss nun herausfinden, welche Art von Geheimnissen sie in einer immer transparenteren Welt überhaupt zu bewahren vermag. Der frühere NSA-Chefberater Joel Brenner kommentierte den plötzlichen Wandel der Arbeitsbedingungen anlässlich eines Forums, das im Dezember 2013 am Media Lab des Massachusetts Institute of Technology stattfand: »Sehr wenig wird künftig geheim sein, und was geheim gehalten wird, wird nicht sehr lange geheim bleiben... Das eigentliche Ziel der Geheimhaltung ist jetzt die Verlängerung der Zerfallszeit von Geheimnissen. Sie sind wie radioaktive Elemente.«

Als Optimisten hoffen wir, dass diese Umbruchperiode uns Organisationen beschert, die den ethischen Maßstäben der Zivilgesellschaft besser entsprechen, und dass wirksame neue Verfahren zur Korrektur unerwünschten Organisationsverhaltens entstehen. Dabei können wir nicht ausschließen, dass unsere Nachrichtendienste dauerhaft geschwächt werden und künftig Gefahren schlechter erkennen.

Informationskriege

Die kambrische Fauna erfand bei ihrem evolutionären Rüstungswettkampf eine Fülle von Ausweichmanövern und Gegenmaßnahmen, und dieses Arsenal von Finten ist seitdem fortwährend gewachsen. Die Tiere haben Tarnungen und Alarmrufe entwickelt sowie grelle Markierungen, die möglichen Räubern fälschlich anzeigen, die Beute sei giftig. Die neue Transparenz wird zu einer ähnlichen Flut von Techniken für den Informationskrieg führen: Kampagnen zur Diskreditierung von Quellen, Präventivangriffe, verdeckte Operationen und so fort.

Die Natur hat seit jeher die Entwicklung täuschender Schutzmechanismen angeregt. Der Tintenwolke, die ein Kopffüßler auf der Flucht vor einem Räuber ausstößt, entsprechen im modernen Luftkrieg Wolken von Metallfäden, die Radarstrahlen



Wir müssen künftige Organisationen an den Werten messen, die für jeden Einzelnen gelten

reflektieren, oder Scheingefechtsköpfe, die Abwehraketensysteme irreführen. Wir sagen Täuschmittel voraus, die einfach aus Megabytes von Desinformation bestehen. Sie dürften rasch von raffinierteren Suchmaschinen entlarvt werden, was wiederum die Erzeugung noch trügerischerer Falschmeldungen provoziert. Zugleich entstehen immer neue Verfahren zur Verschlüsselung und Dechiffrierung, mit denen Organisationen und Einzelpersonen ihre Daten zu schützen suchen.

Eine Artenexplosion von Organisationen

Aus unserem Vergleich mit der kambrischen Explosion folgt schließlich, dass wir bald eine enorme Artenvielfalt von Organisationen erleben werden. Das geschieht derzeit noch nicht, aber wir können nach Vorzeichen Ausschau halten:

► In den USA wurde kürzlich eine neue Klasse von Firmen namens Benefit Corporations geschaffen. Eine solche B Corp verfolgt nicht nur das Unternehmensziel, maximalen Gewinn zu machen, sondern strebt erklärtermaßen auch positive Wirkungen auf Gesellschaft und Umwelt an.

► Google und Facebook brachen mit einer Tradition, indem sie für ihre Gründer ungewöhnlich mächtige Stimmrechte in Kraft setzten und dadurch öffentlich gehandelte Firmen schufen, die dennoch unter privater Kontrolle bleiben. Damit können die Gründer ihr Unternehmen nach langfristigen Plänen führen, ohne groß Rücksicht auf die kurzfristigen Kursschwankungen der Börse zu nehmen.

► Die Proteste am Beginn des so genannten arabischen Frühlings hätten ohne den Einsatz sozialer Medien niemals so schnell derartige Ausmaße erreichen können. Darin zeigt sich vielleicht eine neuartige Form spontaner, freilich auch vergänglicher Selbstorganisation.

Anscheinend stehen wir tatsächlich am Beginn einer radikalen Auffächerung des Stammbaums menschlicher Organisationsformen.

Das Tempo, in dem die Transparenz eine Organisation prägt, hängt von deren Stellung im Wettbewerb ab – quasi von ihrer ökologischen Nische. Firmen sind dem Einfluss der öffentlichen Meinung am meisten ausgesetzt, denn der Kunde kann sich leicht für Alternativen entscheiden. Wird eine über Jahrzehnte hinweg aufgebaute Marke vernachlässigt, verschwindet sie vielleicht binnen Monaten vom Markt. Kirchen und Sportvereine sind durch die tief verwurzelten kulturellen Gewohnheiten und sozialen Vernetzungen ihrer Mitglieder etwas besser geschützt. Doch wenn Kindesmissbrauch oder Kopfverletzungen, die vor dem Aufkommen des Internets lange ignoriert wurden, ins grelle Licht der Transparenz geraten, müssen sich selbst die mächtigsten dieser Organisationen anpassen – oder sie gehen unter.

Regierungssysteme sind am besten geschützt vor unmittelbarem evolutionärem Druck. Durch soziale Medien forcierte Proteste können zwar Regierende und Parteien stürzen, aber die etablierten Staatsorgane bleiben von einem Wechsel der politischen Führung meist ziemlich unberührt. Der Staatsapparat ist nur geringem Wettbewerbsdruck ausgesetzt und entwickelt sich deshalb am langsamsten. Doch selbst hier sollten wir einen erheblichen Wandel erwarten, denn die Macht, welche Einzelpersonen und Außenseiter durch den Einblick in Organisationen gewinnen, wird zweifellos zunehmen. Unter öffentlichem Druck gewähren Regierungen Zugang zu riesigen Strömen von Rohdaten, die über interne Vorgänge Auskunft geben. In Verbindung mit Fortschritten in groß angelegter Musteranalyse, Datavisualisierung und datengestütztem Journalismus beschleunigen machtvolle soziale Rückkopplungsschleifen die Transparenz von Herrschaftssystemen.

Die neu entstehende menschliche Ordnung stößt allerdings an gewisse selbst gesetzte Grenzen. Ameisenstaaten können mehr erreichen als einzelne Ameisen, und ebenso überschreiten menschliche Organisationen die Fähigkeiten Einzelner. So können Erinnerungen, Überzeugungen, Pläne, Aktionen und vielleicht sogar Werte entstehen, die weit über menschliches Maß hinausgehen. Doch unser Entwicklungsweg schreibt uns nun einmal vor, noch so übermenschliche Organisationen an den Werten zu messen, die für jedes Individuum gelten. Diese selbstregulierende Dynamik, welche die beschleunigt wachsende Fähigkeit zur Kommunikation zwischen Mensch und Maschine dem Wohl des Individuums unterwirft, zeichnet unsere Gattung vor anderen Lebensformen aus. ~

DIE AUTOREN



Daniel C. Dennett (links) ist Professor für Philosophie und Direktor des Center for Cognitive Studies an der Tufts University in Medford/Somerville (US-Bundesstaat Massachusetts). **Deb Roy** ist Assistenzprofessor am

Massachusetts Institute of Technology (MIT), Direktor des Laboratory for Social Machines am MIT Media Lab und leitender Medienwissenschaftler bei Twitter. Außerdem berät er das Weltwirtschaftsforum über soziale Medien.

QUELLEN

Dennett, D.: The Social Cell: What Do Debutante Balls, the Japanese Tea Ceremony, Ponzi Schemes and Doubting Clergy All Have in Common? In: New Statesman 140, S. 48–53, 2011

Greenwald, G.: Die globale Überwachung: Der Fall Snowden, die amerikanischen Geheimdienste und die Folgen. Droemer, München 2014

Parker, A.: In the Blink of an Eye. How Vision Sparked the Big Bang of Evolution. Basic Books, New York 2003

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1343336

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.



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

So einfach erreichen Sie uns:

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

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!





Krähen als Meeresräuber

»Vor etwa 20 Jahren waren die Krähen zur Winterzeit an den Nordseeküsten sehr selten, da es ihnen hier an Nahrung fehlte; aber nach und nach

lernten sie in den Muschelbänken reiche Nahrungsquellen kennen. Leider können sie die feste Schale mit dem Schnabel nicht zerbrechen; doch die Krähen erheben sich hoch in die Luft und lassen die Muschel auf einen Stein fallen. Natürlich glückt dies nicht immer; dann erheben sie sich wieder, bis die Schale zerbrochen ist und der Inhalt verzehrt werden kann.« Prometheus, Heft 1337, S. 592

Wie das Meer das Licht verschlingt

»Die Physik hat ein Interesse daran, zu ermitteln, wie weit Licht von gegebener Stärke in eine Wasserschicht einzudringen vermag. Sonnenstrahlen dringen bis zu einer Tiefe von 100 Meter, aber mit einer Abschwächung, von der die roten Strahlen stärker betroffen werden als die blauen. In 500 Meter

Zeitrechnung auf Aztekisch

»Man ist heute der Ansicht, daß das Zahlensystem der alten Azteken das genaueste war, das jemals existierte. Sie teilten das Jahr in 18 Monate zu 20 Tagen, zuzüglich fünf Schalttage. Von den 20 Tagen hatte jeder ein besonderes Abzeichen. Jedes einzelne wurde in einen dazu ausgewählten Kalenderstein eingemeißelt und ist auf dem Kalenderstein aus Mexiko, konzentrischen Kreise deutlich sichtbar. Erst der Anfangstag des fünften Jahres trug wieder den Namen desselben Zeichens wie des ersten. Durch eine einzige Zahl und einen Namen war man in der Lage, Jahr und Tag genau anzugeben.« Kosmos, Heft 6, S. 202/203



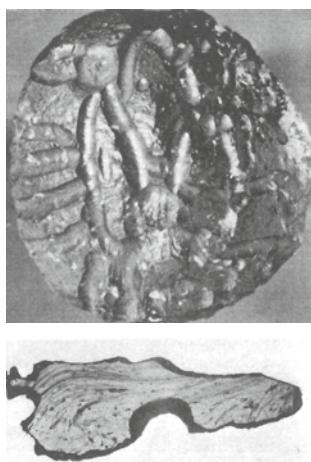
ANACORIA / CC-BY-3.0 (CREATIVE COMMONS)

Erste Schritte der 3-D-Fernsehtechnik

»Auf dem Fernseh-Festival in Monte Carlo erregte eine Mitteilung des tschechoslowakischen Fernsehdirektors Hofman Aufsehen, in der ein neues Verfahren für Fernsehen mit Raumbild angekündigt wurde. Das Verfahren bedient sich bei der Sendung zweier Kameras und beim Empfang eines Filters, das ohne Mühe über dem Bildschirm des Geräts anzubringen ist. Auf diese Nachricht hin teilte der brasiliatische Kameramann Carlos Creitas in Rio de Janeiro mit, dass ein

Tiefe ist von den roten Sonnenstrahlen nicht die Spur einer Wirkung übrig; dagegen sind die violetten und ultravioletten Strahlen durch eine photographische Platte sogar in 1000 Meter noch wahrnehmbar. Sie scheinen erst in 1700 Meter Tiefe zu verschwinden.« Central-Zeitung für Optik, Heft 17, S. 161

Sternschnuppen aus Glas



Tektiten aus Indonesien (oben) und Moldawien (unten, Schliff).

»An einigen Stellen der Erde finden sich eigenartige gläserne Gesteine, die keinerlei Beziehungen zur Geologie oder Mineralogie ihrer Fundstätte aufweisen. Je nach dem Ort ihres Vorkommens benannt, werden sie unter dem Sammelnamen ‚Tektite‘ zusammengefaßt. Ihre Oberfläche ist von eigenartigen Riefen, Grübchen und Kannelierungen bedeckt. Ihr Aussehen ist das eines künstlichen Glases, grün oder flaschenbraun gefärbt und in dünnen Stücken durchsichtig. Ihre Größe liegt

meist um 2 bis 3 cm. Einige Forscher führen sie zurück auf Meteoriten- und Kometenaufschlag, auf Blitzwirkung und auf Wald- oder Kohlenflözbrände; andere sehen in ihnen Schmelzprodukte der frühgeschichtlichen Technik oder Auswürflinge von Mondvulkanen. Da die früheren Hypothesen nicht befriedigten, vermutet man in den Tektiten jetzt Mondmaterie. Viele Astronomen sind der Auffassung, daß Mondkrater durch Meteoritenaufprall entstanden



anderes, von ihm entwickeltes Raumbild-Fernseh-System noch vorher der Öffentlichkeit vorgeführt werde. Dieses Verfahren bediene sich nur einer Kamera, durch ein System von Spiegeln ergänzt, könne jedoch vom Publikum nur durch eine Spezialbrille mit polarisiertem Glas aufgenommen werden.« Neuheiten und Erfindungen, Heft 350, S. 109

seien. Da solche von mehr als 200 km Durchmesser auftreten, müßten stellenweise gewaltig große Meteoriten auf den Mond niedergegangen sein. Einige Forscher halten es für möglich, daß ein Teil der von diesen erzeugten Impaktite den Weg zur Erde gefunden hat; eben die Tektite.« (Anm. d. Red.: Heute geht man überwiegend davon aus, dass es sich um durch Meteoriteinschlag aufgeschmolzenes und fortgeschleudertes irdisches Material handelt.) Kosmos, Heft 6, S. 257/258



Rolf Heilmann

Auch Physiker kochen nur mit Wasser
Wo die Wissenschaft an ihre Grenzen gerät
 Herbig, München 2015
 240 S., € 20,-

PHYSIK

Auf der Suche nach letzten Antworten

Die Physik kann das Wesen der Welt nicht erschöpfend erklären, meint einer ihrer Vertreter.

» **W**o die Wissenschaft an ihre Grenzen gerät« – der Untertitel trifft den Inhalt des Buchs sehr gut. Autor Rolf Heilmann verficht darin den Standpunkt, die Physik sei nicht der Weisheit letzter Schluss. Heilmann ist selbst Physiker, entwickelte Lasersysteme für Satelliten am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und lehrt

weit gehend verlernt. So nähmen wir unbekümmert hin, dass wir auf einer riesigen rotierenden Kugel leben, die durchs leere All rast. Eigentlich sei das ungeheuerlich, doch man habe uns beigebracht, nicht weiter darüber nachzudenken.

In diesem Duktus fährt der Text fort bis etwa zum Ende des ersten Buchdrit-

Wie soll man sich die elektrische Ladung vorstellen? Am besten gar nicht

heute Physik an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München.

Auf die Frage, warum Gegenstände nach unten fallen, würden die meisten korrekt mit der Gravitationskraft antworten, führt Heilmann beispielhaft an. Doch schon bei der simplen Nachfrage, warum es die Schwerkraft denn gebe, müsse auch ein gestandener Physiker die Segel streichen. Im Prinzip, schreibt der Autor, können alle Warum-Frageketten von Naturwissenschaftlern nicht abschließend beantwortet werden. Spätestens nach zwei- oder dreimaligem Nachhaken stießen wir an die Grenzen des Verstehbaren.

Eine Gewissheit über die ersten beziehungsweise letzten Ursachen könne die Naturwissenschaft nicht geben, betont der Physiker. Uns bleibe, über die Welt zu staunen, doch das hätten wir

tels. Heilmann mahnt zum Staunen und betont ein ums andere Mal, dass die Wissenschaft nicht alles erklären kann. Auf Dauer ist das ein wenig redundant, und man beginnt sich zu fragen, worauf der Autor hinauswill. Zumal er gelegentlich von »Schöpfung« oder »Gott« schreibt und fragt, ob Gott einen Plan habe.

Es lohnt jedoch, die Lektüre durchzuhalten. Denn im hinteren Teil wird das Buch sehr interessant. Heilmann befasst sich hier mit Wissenschaftsgeschichte und physikalischen Theorien und erläutert, wie die heute gängigen Modellvorstellungen entstanden sind. Dabei zeigt sich, wie sehr die Physik auf Konventionen, Vereinfachungen und (wenig treffenden) Vergleichen beruht. So wurde die Richtung des elektrischen Stroms anfangs willkürlich festgelegt,

und zwar falsch herum. Erstaunlich: Basierend auf dieser irrtümlichen Konvention ließ sich eine gigantische Techniksphäre aufbauen, die sogar funktionierte. Elektrotechniker behalten die falsche Festlegung bis heute bei.

Überhaupt ist der Begriff »elektrische Ladung« genau betrachtet ziemlich zweifelhaft, wie Heilmann darlegt. Er resultierte ursprünglich aus der Vorstellung, Körper, von denen elektrische Kräfte ausgehen, müssten zuvor mit etwas »beladen« worden sein. Doch wenn man einen Gegenstand elektrisch »lädt«, wird er nicht messbar schwerer oder leichter. Wie soll man sich die »elektrische Ladung« also vorstellen? Am besten gar nicht, empfiehlt der Autor: Sie ist ein Modell. Offen zu Tage tritt das, wenn Physiker im Hinblick auf die starke Wechselwirkung von »Farbladungen« sprechen, ein Begriff, der nur noch bildhaftes Abstraktum ist. Heilmann warnt davor, solche Modelle für die Wirklichkeit zu halten.

Der Autor streift die newtonsche Mechanik, die maxwellsche Theorie der elektromagnetischen Felder, die Relativitätstheorie und vieles mehr. Auch auf die Quantenphysik geht er ein. Dabei pflegt er durchweg einen gut verständlichen Stil. Die Vorstellung des Quatums, schreibt Heilmann, sei zunächst ein Notbehelf gewesen, mit dem Physiker wie Max Planck (1858–1947) selbst nicht zufrieden waren. Doch sie erlaubte, das Strahlungsspektrum eines Körpers in Abhängigkeit von seiner Temperatur exakt zu berechnen – eine Auf-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Mehr Rezensionen
 finden Sie unter:
[www.spektrum.de/
 rezensionen](http://www.spektrum.de/rezensionen)



gabe, an der Physiker lange gescheitert waren. Auf dieser Grundlage entwickelte Erwin Schrödinger (1887–1961) eine »Wellenmechanik«, die Quanten wie das Elektron mit einem mathematischen Gebilde namens Wellenfunktion beschreibt. Damit konnte man beispielsweise Orbitale (»Elektronenhüllen«) von Atomen berechnen und grafisch darstellen. Doch was zeigen diese Bilder eigentlich? Sehen Elektronenhüllen so aus? »Den Begriff ›Aussehen‹ gibt es nur in unserer mittleren Welt«, schreibt Heilmann, »im Nanobereich hat er keine Bedeutung mehr.« Auch

die Orbital-Bilder seien demnach nur Hilfskonstrukte.

Entropie, Emergenz, Symmetrie, Information: Der Autor erklärt wichtige Schlüsselkonzepte der Physik, macht sie anschaulich und zeigt zugleich, wo sie an Grenzen stoßen. Demnach müssen wir beim Beschreiben der Welt mit einem evolutionär entstandenen Denk- und Wahrnehmungsapparat arbeiten, der lediglich an den Bereich der mittleren Abmessungen angepasst ist. Unsere bildhaften Vorstellungen, geprägt vom Filter der Sinnesorgane, taugen deshalb nur für einen winzigen Bereich

auf der Skala der Naturphänomene; überall sonst versagen sie. Trotzdem gelingt es Menschen, sich Modelle auszudenken, die korrekte Vorhersagen über die Dinge da draußen liefern – sei es in kosmischen Maßstäben oder auf der Ebene der Elementarteilchen. Wir machen uns zu selten klar, wie erstaunlich das ist: So lautet die Botschaft dieses zwar nur karg bebilderten, aber dennoch empfehlenswerten Buchs.

Frank Schubert

Der Rezensent ist Biophysiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Peter Poschlod

Geschichte der Kulturlandschaft

Eugen Ulmer, Stuttgart 2015

320 S., € 39,90

LANDSCHAFTSGESCHICHTE

12 000 Jahre Wandel

Ein anschauliches, detailreiches Buch darüber, wie der Mensch die europäische Landschaft seit der Jungsteinzeit geformt hat.

Im vorliegenden Werk wirft Peter Poschlod, Biologe und Ökologe, einen Blick auf die zurückliegenden 12 000 Jahre. Er nimmt seine Leser mit auf eine Reise, die bei der Domestikation erster Haustiere in der Jungsteinzeit beginnt und bei den jüngsten EU-Agrarreformen endet. Jahrtausende, in denen sich der europäische Naturraum unablässig gewandelt hat, bis er in die heutige Kulturlandschaft überging.

Interessierten Lesern wird vieles davon bekannt sein. Dessen ungeachtet ist es Poschlod ausgesprochen gut gelungen, die Entwicklung des Naturraums auf 320 Seiten kompakt, anschaulich und unterhaltsam darzustellen. Zehn Jahre haben die Recherchen für das Werk gedauert, und das Ergebnis kann

sich sehen lassen. Der Autor hat eine enorme Fülle an Hintergrundinformationen zusammengetragen und verweist bei seinem Abriss der Landschaftsentwicklung auf mehr als 1500 wissenschaftliche und historische Quellen. Seine Sachkenntnis wird auf jeder Seite deutlich.

Chronologisch geordnet zeigt Poschlod auf, wie unsere Vorfahren ihre Umwelt seit der Sesshaftwerdung bewusst und unbewusst gestaltet haben. Beginnend im »Fruchtbaren Halbmond« am nördlichen Rand der Syrischen Wüste, später auch in Europa kultivierten sie Nutzpflanzen und domestizierten Wildtiere. Dabei wandelten sie zwecks Nahrungsmittelproduktion den ursprünglichen Naturraum immer wei-

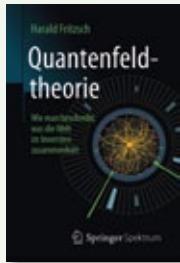
ter um. Ein Prozess, der im 20. Jahrhundert in gezielte Maßnahmen der Flurbereinigung mündete. Prägnant stellt der Autor verschiedene Faktoren dar, die diese Entwicklung mitbestimmten. Klimaveränderungen finden hier ebenso Berücksichtigung wie soziale, demografische und politische Gegebenheiten. Epidemien, Kriege, Erkenntnisfortschritte und staatliche Steuerung – sie alle haben zum tief greifenden Wandel des Landschaftsbilds beigetragen.

Viele Grafiken fördern das Verständnis, zudem lockern historische und aktuelle Abbildungen das gut lesbare Buch auf. Anhand detailreicher Tabellen kann der Leser seine Kenntnisse genauso vertiefen wie mit den zahlreichen Infoboxen.

Der Autor unterstreicht sein Anliegen, die Prozesse der Landschaftsentwicklung sachlich und neutral zu beschreiben. Diesem Anspruch wird er gerecht. Aus der Fülle des aufbereiteten Materials geht dennoch hervor: Die zurückliegenden 12 000 Jahre haben zwar einen ungemein wertvollen kulturlandschaftlichen Schatz hervorgebracht, zugleich aber nahm im Zuge von Industrialisierung und Monokultur die Artenvielfalt rasant ab. Poschlods Buch trägt überzeugend dazu bei, dies bewusst zu machen.

Tim Haarmann

Der Rezensent ist Meeresgeologe und arbeitet in Bonn.



Harald Fritzsch

Quantenfeldtheorie – Wie man beschreibt, was die Welt im Innersten zusammenhält

Springer, Berlin 2015. 122 S., € 24,95

Wie verheiratet man spezielle Relativitätstheorie und Quantenmechanik? Das fragen sich Physiker und Mathematiker seit Jahrzehnten. Aus ihren Überlegungen und Experimenten ist unter anderem die Quantenfeldtheorie hervorgegangen, die der theoretische Physiker Harald Fritzsch in diesem Buch präsentiert. Er beschreibt Phänomene der Quantenfeldtheorie wie die tief-inelastische Streuung, die Physiker erstmals Ende der 1960er Jahre am Stanford Linear Accelerator Center in Kalifornien beobachteten. Dabei fanden sie indirekte Hinweise auf Quarks im Inneren von Nukleonen. Fritzsch führt zahlreiche Formeln auf und versieht sie allenfalls mit kurzen Texterläuterungen. Sein Werk gleicht über große Strecken einer reinen Formelsammlung. Leser ohne solide mathematisch-physikalische Vorbildung sind darinrettungslos verloren. Das steht in Widerspruch zur Aussage des Verlags, wonach das Buch die Quantenfeldtheorie »endlich verständlich erklärt«. Ungeachtet dieser Diskrepanz eignet sich der Band als Überblickswerk für Physiker.

THORSTEN NAE瑟ER



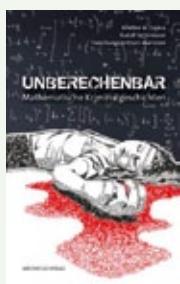
Reiner Nürnberg, Ekkehard Hoxtermann, Martina Voigt (Hg.)

Elisabeth Schiemann (1881–1972)**Vom Aufbruch der Genetik und der Frauen in den Umbrüchen des 20. Jahrhunderts**

Basiliken-Presse, Rangsdorf 2014. 575 S., € 39,-

1946 erhält die damals 65-jährige Elisabeth Schiemann einen Lehrauftrag für Genetik und Geschichte der Kulturpflanzen an der Friedrich-Wilhelm-Universität zu Berlin. Es ist die überfällige Würdigung einer Frau, die sich als Wissenschaftlerin, Kirchenmitglied und Widerstandskämpferin gegen das Nazi-regime hervorgetan hat. 70 Jahre später ehrt die Universität, die inzwischen den Namen Humboldt trägt, Schiemann erneut, indem sie ihr ein Wissenschaftssymposium widmet. Der vorliegende Band ist daraus hervorgegangen und beleuchtet Schiemanns Leben. Von ihren deutsch-baltischen Wurzeln über die Berufsperspektiven von Wissenschaftlerinnen vor 100 Jahren bis zur Genetik von Nutzpflanzen überspannt das überwiegend allgemein verständliche Buch ein breites Themenspektrum. Fotos, Briefe und Literaturverweise laden dazu ein, sich in die Materie zu vertiefen.

MAREN EMMERICH



Kristine Al Zoukra, Rudolf Kellermann (Hg.)

Unberechenbar – Mathematische Kriminalgeschichten

Westkreuz, Berlin 2015. 229 S., € 14,90

Mathematik ist ihrem Wesen nach eine sehr verbrechensferne Tätigkeit: Zu diesem beruhigenden Schluss kommt man angesichts der vorliegenden Bestenauslese eines Krimigeschichten-Wettbewerbs, den das Berliner Forschungszentrum Matheon ausgeschrieben hatte. Ja, es ist reizvoll, der abgefahrener Erzählung von Dieter Creutzburg zu folgen: Es habe einen Beweis der (tatsächlich unbewiesenen) goldbachschen Vermutung gegeben, der aber infolge einer übeln Intrige mit Mord und Totschlag in der Spree versunken sei. Und in der Geschichte von Martina Kleinau macht sich ein Professor Weitensicht mit Hilfe eines verzwickten Logikrätsels unverfolgbar aus dem Staub. Aber dann beginnen schon die reichlich konstruierten Verknüpfungen von Verbrechen und Mathematik, etwa eine ganz gewöhnliche Mordgeschichte, die mit einem Schwall an entbehrlichen Fachausrücken angedickt wurde. CHRISTOPH PÖPPE



Randall Munroe

What if? Was wäre wenn? – Wirklich wissenschaftliche Antworten auf absurd hypothetische Fragen

Aus dem Englischen von Ralf Pannowitsch. Knaus, München 2014. 368 S., € 14,99

Kann man ein Steak braten, indem man es aus großer Höhe fallen lässt? Was würde passieren, wenn alle Blitze, die in einem bestimmten Moment auf der Welt niedergehen, an derselben Stelle einschlägen? Wie viele Maschinengewehre braucht man, um mit deren Rückstoß abzuheben? Und wie lange hält ein U-Boot im Weltraum durch? Auch absurde Fragen verdienen Antworten, dachte sich Randall Munroe und gibt sie im vorliegenden Buch. Der ehemalige Robotik-Experte der NASA lässt darin Wissenschaft und Fiktion aufeinanderprallen. Für die Leser ist das ein großer Spaß: Munroe kommentiert ironisch, zeichnet Comics und inszeniert sich als liebenswürdiger Nerd. Bei alldem vermittelt er erstaunlich viel Wissen – vor allem darüber, wie man an Fragen wissenschaftlich herangeht. Ein empfehlenswertes Buch. THERESA MOEBUS



Walter Mischel

Der Marshmallow-Test

Willensstärke, Belohnungsaufschub und die Entwicklung der Persönlichkeit

Aus dem Englischen von Thorsten Schmidt

Siedler, München 2015

395 S., € 24,99

PSYCHOLOGIE

Die Vermessung der Willenskraft

Ein berühmtes Experiment und die Folgen.

Walter Mischel ist ein Urgestein der wissenschaftlichen Psychologie. 1930 in Wien geboren, floh er als Achtjähriger mit seiner Familie vor den Nazis und fand in den USA ein neues Leben an. Es sollte ein erfolgreiches werden, obwohl Mischel von sich selbst sagt, er sei nicht gerade der disziplinierteste Geist.

Nach Studium und Promotion in klinischer Psychologie wirkte er ab den 1960er Jahren vor allem an der Stanford University in Kalifornien sowie später an der Columbia University in New York. In seiner langen Laufbahn gab es der Entwicklungs- und Persönlichkeitspsychologie viele Anstöße. Der Nach-

welt in Erinnerung bleiben dürfte er aber vor allem für jene Studienserie, die als der »Marshmallow-Test« berühmt wurde.

In einem eigens eingerichteten »Überraschungszimmer« an der Universität in Stanford stellten Mischel und sein Team Kinder verschiedenen Alters vor die Wahl: Entweder die Kleinen nahmen eine Süßigkeit, die vor ihrer Nase platziert war, sofort an – oder sie warteten auf die Rückkehr des Versuchsleiters, der den Raum verlassen hatte, um dann die doppelte Ration zu erhalten. Die Kinder standen vor der Wahl: lieber ein Marshmallow sofort oder zwei später? Dieser simple Test sollte die Fähigkeit zum Belohnungsaufschub prüfen – eines, wie man glaubte, festen Indikators für die Willensstärke. Wie der weitere Lebensweg der Kinder offenbarte, erzielten jene, die der Versuchung leichter widerstanden hatten, später im Schnitt bessere Schulnoten und Bildungsabschlüsse,

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 der Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« und »Das Interview« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Ort: Heidelberg

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

Spektrum-Workshop »Das Interview«; Preis: € 179,- pro Person; Sonderpreis für Abonnenten: € 159,-

Weitere Informationen und Anmeldemöglichkeit:

Telefon: 06221 9126-743
spektrum.de/schreibwerkstatt

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

Hier QR-Code per Smartphone scannen!



waren kompetenter im sozialen Umgang und bewältigten Stress besser.

Heißt das, der Erfolg oder Misserfolg eines Menschen ist vorgezeichnet und vor allem eine Frage der Selbstbeherrschung? Mischel verneint das. Die Ergebnisse seines Tests seien zwar vielfach so gedeutet worden, aber zu Unrecht. Das vorliegende Buch habe er geschrieben, um diese Fehldeutung zu berichtigen. »Es gibt keinen Automatismus, das Ergebnis im Marshmallow-Test lässt nicht zwangsläufig darauf schließen, ob ein Kind später ein gutes Leben, Glück und Erfolg haben wird«, stellt der Autor gleich auf der ersten Seite klar. Insbesondere der Idee, Selbstdisziplin sei ein festes, erblich bedingtes Charaktermerkmal, widerspricht Mischel, wobei er auf zahlreiche Untersuchungen verweist. Sie zeigten, dass Willensstärke und Selbstbeherrschung je nach Situation stark schwanken. Es komme ganz auf die Umstände und unsere jeweilige Motivlage an.

Die Bekanntheit des Marshmallow-Experiments gründet zu einem guten Teil auf den Aufnahmen der putzig anzusehenden kleinen Probanden, die man mit versteckter Kamera filmte, während sie der Verlockung zu widerstehen versuchten. Manche inspirierten die Süßigkeit genau, andere rutschten unruhig auf ihrem Stuhl hin und her oder pfiffen ein Lied, um sich abzulenken. Laut Mischel entscheide weniger die Willenskraft selbst über den Erfolg des Entsagens als vielmehr die Fähigkeit, sich im richtigen Moment auf andere Gedanken zu bringen. Nicht Fokussierung auf das Ziel, sondern bedarfswise Ablenkung sei das Erfolgsrezept – eine Nachricht, die eifrige Selbstoptimierer nachdenklich machen sollte.

In 20 Kapiteln befasst sich Mischel mit dem Marshmallow-Experiment und seinen Folgen. Dabei streut er immer wieder Fallbeispiele und Anekdoten aus seiner Forscherkarriere ein,

führt jedoch keine dieser Episoden länger aus oder entwickelt daraus einen roten Faden. So gleicht sein Bericht eher einem großen Puzzle als einer geschlossenen Erzählung.

Trotz dieser dramaturgischen Schwächen liest man Mischels Ausführungen mit Gewinn. Die Studien, über die er berichtet, reichen von den späten 1950er Jahren bis in die heutigen Tage und umreißen die gesamte Forschung zur Willensstärke. Besonders wichtig ist dem Autor der Hinweis, dass sich das Durchhaltevermögen trainieren lässt – ein weiteres Argument gegen die vermeintlich schicksalssbestimmende »Lotterie der Gene«, die den einen zum guten Selbstbeherrschter mache und den anderen zum Opfer seiner Impulse. Ganz so einfach ist der Erfolg im Leben dann doch nicht vorherzusagen.

Steve Ayan

Der Rezensent ist Redakteur bei »Gehirn und Geist«.



Alex Bellos
Warum die Elf hat, was die Zehn nicht hat
Entdeckungstouren in die faszinierende Welt der Zahlen
 Aus dem Englischen von Bernhard Kleinschmidt
 Berlin-Verlag, Berlin 2015
 396 S., € 22,99

MATHEMATIK

Launiger Streifzug durchs Abstrakte

Journalist Alex Bellos unternimmt eine Reise durch die Welt der Zahlen und weiß dabei viel zu erzählen.

Der Autor des vorliegenden Buchs hat einen recht interessanten Werdegang hinter sich. Nach Mathematik- und Philosophiestudium arbeitete er einige Jahre als Journalist in Brasilien und befasste sich dort unter anderem mit Fußball. Er schrieb ein Buch darü-

ber und wirkte als Ghostwriter an einer Autobiografie des brasilianischen Kickers Pelé mit. Anschließend wandte er sich der Mathematik zu. Für sein erstes Buch auf diesem Gebiet (»Alex im Wunderland der Zahlen«, Rezension siehe www.spektrum.de/rezension/alex-im-wunderland-der-zahlen/1140889) be-

kam er mehrere Preise. Regelmäßig veröffentlicht er unterhaltsame Mathe-matik-Kommentare auf der Website der britischen Tageszeitung »The Guardian« (www.theguardian.com/profile/alexbellos).

Ob der etwas sperrige deutsche Titel seines neuen Werks glücklich gewählt ist, werden die Verkaufszahlen zeigen. Der Verlag vermißt dort das Wort »Mathematik« – möglicherweise in der Annahme, es sei abschreckend. Jedenfalls spielt die Buchüberschrift auf das erste Kapitel an, in dem der Autor beschreibt, welche Assoziationen Zahlen hervorrufen können. Man erfährt unter anderem, dass bereits bei den Pythagoräern im 6. vorchristlichen Jahrhundert die ungeraden Zahlen als männlich, die geraden als weiblich galten. Auch verrät Bellos, welche Bedeutung bestimmte Zahlen in asiatischen Kulturen haben, wie sie in der Werbung wirken und welche Tricks sich beim Gestalten von Speisekarten und Preisschildern anwenden lassen. Das Kapitel schließt mit

den Ergebnissen einer Internetumfrage zu den beliebtesten Zahlen, die der Autor durchgeführt hat, sowie mit den Resultaten verschiedener psychologischer Untersuchungen.

Dieses und die übrigen neun Kapitel lassen sich weit gehend unabhängig voneinander lesen. Der Autor ermuntert seine Leser sogar dazu, mit der Lektüre eines Abschnitts aufzuhören und zum nächsten überzugehen, falls die Verständnisschwierigkeiten zu groß werden. Jedes Kapitel beginnt er als neuen, eigenständigen Teil, meist mit einer einleitenden Geschichte, die Interesse am jeweiligen Stoff wecken soll. So berichtet er von einem Taxifahrer mit Asperger-Syndrom, der davon beseessen ist, Zahlen in Primfaktoren zu zerlegen, oder erzählt von einem Engländer, der sich das skurrile Ziel gesetzt hat, alle 6500 Triangulationspunkte in Großbritannien aufzusuchen.

Bellos behandelt Kegelschnitte, Drehbewegungen, die Bedeutung der euler-

schen Zahl e , negative und komplexe Zahlen, mathematische Beweistechniken und zelluläre Automaten. Dabei pflegt er einen plaudernden Schreibstil, den viele Leser als ansprechend empfinden dürften. Positiv hervorzuheben sind die Klarstellungen, Anmerkungen und Literaturhinweise im Anhang sowie ein 18-seitiges Glossar. Das Werk enthält auch zahlreiche Abbildungen und Grafiken, die das Verständnis fördern. Etwas überflüssig erscheint es hingegen, dass der Autor in jedem Kapitel erwähnt, er habe ein thematisch einschlägiges Interview mit einem interessanten Menschen geführt. Zudem unterbricht er den Text hin und wieder abrupt mit Termen und Gleichungen, die bei mathematisch wenig Vorgebildeten sicherlich Fragen aufwerfen werden. Entsprechende Herleitungen und Erläuterungen finden sich im Anhang, diese sind jedoch im Stil eher formal und weniger ansprechend als vorn im Buch.

Ein großes Ärgernis erwartet die Leser ausgerechnet dort, wo Bellos auf eine der schönsten mathematischen Beziehungen eingeht, nämlich auf die Gleichung $e^{i\pi} + 1 = 0$. Innerhalb eines elf Seiten langen Abschnitts steht hier an sage und schreibe zehn Stellen die imaginäre Einheit i nicht im Exponenten, sondern als Faktor hinter der eulerschen Zahl e . Es ist allerdings davon auszugehen, dass diese schockierende Fehlerhäufung in späteren Auflagen beseitigt wird.

»Warum die Elf hat, was die Zehn nicht hat« eignet sich als Geschenk für mathematisch Interessierte. Trotz der genannten Schwächen ist es unterhaltsam und informativ geschrieben und hat durchaus das Potenzial, auch jugendliche Leser zu erreichen.

Heinz Klaus Strick

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



ALLES ÜBER IHRE GRAUEN ZELLEN. SCHWARZ AUF WEISS.

JETZT IM
MINIABO
KENNEN LERNEN*

In **Gehirn und Geist** informieren renommierte Wissenschaftler und Fachjournalisten über die Erforschung von Ich und Bewusstsein, Intelligenz, Emotionen und Sprache.

In Ausgabe 06/2015 mit Spezial:
DIE NEUROBIOLOGIE DER ANGST

*Drei aktuelle Ausgaben für nur € 5,10 je Heft (statt € 7,90 im Einzelkauf).

So können Sie bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

www.gehirn-und-geist.de/miniabo

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



Peter Blickle
Der Bauernjörg
Feldherr im Bauernkrieg
C.H.Beck, München 2015
586 S., € 34,95

GESCHICHTE

Menschenschlächter und »Reichsretter«

Jörg Truchsess von Waldburg machte sich in den Bauernkriegen einen Namen – als Feldhauptmann, der die Aufstände gnadenlos niederschlug.

»Von der Parteien Gunst und Hass verwirrt, schwankt sein Charakterbild in der Geschichte.« Schillers Worte aus dem Prolog zum »Wallenstein« beziehen sich auf den berühmtesten Feldherrn des Dreißigjährigen Kriegs, doch könnte man sie ebenso gut auf Jörg Truchsess von Waldburg (1488–1531) anwenden. »Bauernschlächter« nann-

Landesherrn aufgestiegen war, gebot er über zahlreiche Leibeigene.

Klarer als die meisten seiner Standesgenossen erkannte von Waldburg die Zeichen der Zeit. Da die Erlöse aus der Grundherrschaft kaum mehr ausreichten, um einen adligen Lebenswandel zu finanzieren, verlegte er sich auf das Kriegshandwerk. Die damals vielfach

Bei von Waldburg fiel die Lust am Töten, Brennen und Plündern zusammen mit einem ausgeprägten Geschäftssinn

ten ihn die einen, »Reichsretter« die anderen. Diese Ambivalenz hat Peter Blickle, emeritierter Professor für Neuere Geschichte an der Universität Bern, in sein ebenso spannendes wie informatives Buch einfließen lassen.

Der Übergang vom Mittelalter zur Moderne war eine Epoche geistiger und kultureller Blüte, aber auch eine Zeit erbitterter Glaubenskämpfe, in der marodierende Landsknechtsheere, angeführt von brutalen Warlords, halb Europa mit Krieg überzogen. In dieses turbulente Umfeld hinein wurde Jörg Truchsess von Waldburg 1488 geboren – als Spross einer Adelsfamilie, die dem staufischen Ministerialengeschlecht entstammte. Ehr- und Standesbewusstsein wurden ihm frühzeitig vermittelt, ebenso die Kriegskunst, die er von der Pike auf lernte. Nachdem er zum oberschwäbischen

bezeugte »Feldsucht«, die Lust am Töten, Brennen und Plündern, fiel bei ihm zusammen mit einem ausgeprägten Geschäftssinn. Als Söldnerführer stand der Oberschwabe ab 1510 bei diversen Fürsten unter Vertrag. Er wechselte des Öfteren nicht nur den Kriegsschauplatz, sondern auch den Auftraggeber.

Seine große Stunde schlug 1525, als die Bauern Südwestdeutschlands im Zeichen des »Bundschuhs« gegen ihre adeligen Grundherren aufbegehrten – von Armut, Frondiensten und Abgaben bedrückt und von reformatorischen Predigern ermutigt. Sie zerstörten Burgen, plünderten Klöster und verlangten im Namen des Evangeliums die Abschaffung der Leibeigenschaft. Um den Aufstand niederzuschlagen, traf Erzherzog Ferdinand von Österreich im Jahr 1524 die Entscheidung, von Wald-

burg zum obersten Feldhauptmann des »Schwäbischen Bundes« zu ernennen: Das war ein genossenschaftlicher Zusammenschluss der schwäbischen Reichsstände, der 1488 auf Betreiben des Kaisers gegründet worden war, um den Landfrieden zu erhalten.

Wie Blickle in seinem Buch beschreibt, erwies sich von Waldburg als abgebrühter, anpassungsfähiger und charismatischer Anführer, der sein Heer geschickt zu dirigieren und den politischen Gegner ins Unrecht zu setzen wusste. Die Forderung der Bauern lehnte er als Landfriedensbruch ab und wertete sie als Affront gegen die göttgewollte Obrigkeit, wie übrigens auch Martin Luther (1483–1546). Seinen Landsknechten verkaufte er den Waffengang gegen die Bauern als »Feldzug gegen den Teufel« – und rechtfertigte so sein kriegerisches Vorgehen.

Von Waldburg, der fortan den Spitznamen »Bauernjörg« trug, erfüllte seinen Auftrag pflichtgemäß, aber wenig ritterlich. In dem ungleichen Kampf der gut gerüsteten und gedrillten Landsknechte des Adels gegen die bäuerlichen »Haufen« hatten Letztere nicht die Spur einer Chance. Skrupellos und grausam ging der »Bauernjörg« gegen seine Feinde vor, ließ Widerstandsnester einschern und Gefangene bei lebendigem Leib verbrennen, rädern und vierteilen.

Die Bluttat war seiner Karriere förderlich, zahlte sich Loyalität doch gerade in diesen unruhigen Zeiten aus – vorausgesetzt, man gewährte sie dem Richtigen. Zum Dank für seine »Verdienste« im Kampf gegen die Rebellen betraute der Kaiser den »Retter des Reiches« mit Aufgaben im diplomatischen Reichsdienst.

Peter Blickle ist ein sehr empfehlenswertes Buch gelungen. Meisterhaft versteht er es, die historischen und sozialen Gegebenheiten des frühen 16. Jahrhunderts in die Biografie seines Protagonisten einzubetten und diesen als »Kind seiner Zeit« anschaulich, nüchtern und vorurteilsfrei darzustellen.

Theodor Kissel

Der Rezensent ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist; er lebt in der Nähe von Mainz.

Unsere Neuerscheinungen

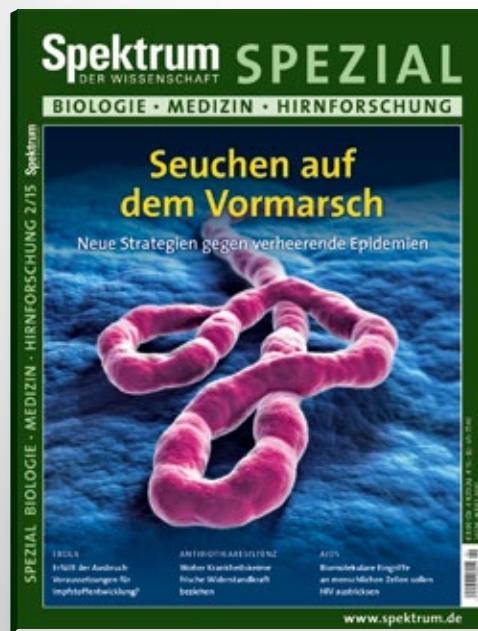


Ab 29.5. 2015 im Handel



Künstliche Körperteile: Forscher arbeiten an fühlenden Prothesen • Verbessertes Gehirn: Wie weit können Neurochips unsere Hirnleistung steigern? • Verkörperung: So schlüpfen wir in Avatare oder Roboter • € 8,90

Was ist was im Sonnensystem? • Ein Komet wird entschleiert • Philae: Die Landung auf einem Kometenkern • Die Top Ten der Kometen • Vorstoß zu einem Protoplaneten • € 8,90



Krieg gegen Ebola: Rückkehr einer Geißel • HIV: Virus unter Kontrolle • Der Ursprung der Malaria • Denguefever: Moskitos mit Selbstmorden • Die Geschichte des Choleraerreger • € 8,90



Bildgebung: Karten vom lebenden Gehirn • Künstliche Intelligenz: Wenn Maschinen das Lernen lernen • Neurochips: Künstliche Nervenzellen im Computer • € 8,90

So einfach erreichen Sie uns:

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

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

Hier QR-Code per Smartphone scannen!



Mehr Eigenverantwortung

Forscher versuchen auf verschiedensten Wegen, der um sich greifenden Zuckerkrankheit entgegenzuwirken (»Neue Waffen gegen die Diabetes-Pandemie«, *Forschung aktuell*, April 2015, S. 17).

Holger Casselmann, Odenthal: Es ist schon erschreckend: nicht nur die Tatsache der dramatischen Zunahme, sondern auch die Art und Weise, wie die Wissenschaft laut diesem Artikel mit dem Problem umgeht. Dass es sich bei Diabetes Typ 2 in fast allen Fällen um eine Erkrankung handelt, die durch eine falsche Lebensweise entsteht und damit auch im Bereich der Eigenverantwortung liegt, wird zwar lobenswerterweise angesprochen, aber wieder schnell relativiert mit Hinweis auf eine mögliche genetische Disposition der Betroffenen. Fazit: Medikamente entwickeln und sich nicht mit der Ursache auseinandersetzen.

Dabei ist eine pandemische genetische Veränderung der Bevölkerung mehr als unwahrscheinlich und kann nicht als Ursache der rasanten Zunah-

me von Diabetikern gelten. Nach wie vor sind Übergewicht und latent hohe Blutzuckerspiegel die kritischen Faktoren der Erkrankung. Die Insulinrezeptoren der Muskelzellen, die die Glukose in die Zellen einströmen lassen, entwickeln durch dauerhaft hohe Blutzuckerspiegel im Lauf der Zeit Resistenz, und es wird immer mehr Insulin erforderlich, um die Glukoseversorgung der Muskeln zu gewährleisten. Diesen Teufelskreis gilt es zu durchbrechen. Die Senkung des Blutzuckerspiegels ohne Medikamente und eine Überwindung der Erkrankung muss doch das wünschenswerte Ziel für die Betroffenen sein – und nicht die Behandlung der Krankheitssymptome.

Reynolds-Zahl fürs Schwimmen irrelevant

Der Physiker Gerhard Gompper erläuterte, dass man etwa von Flimmerhärrchen lernen kann, wie Mikrotransportsysteme funktionieren können; hier charakterisiert die Reynolds-Zahl die Eigenschaften einer Strömung, die sich zwischen Mikro- und Makrowelt stark unterscheiden (»Der Weg

zum schwimmenden Nanoroboter«, April 2015, S. 84).

Markus Enz, Hettlingen (Schweiz): Als Leistungsschwimmer war ich im Physikstudium davon frustriert, wie wenig praktisch Verwendbares ich in der Physik gefunden habe. Insbesondere kann man aus der Reynolds-Zahl keine Empfehlungen fürs Schwimmen ableiten, da es bei Reynolds-Zahlen im Millionenbereich keine Rolle spielt, ob sie ein wenig größer oder kleiner sind. Erst viel später habe ich die Physik entdeckt, die fürs Schwimmen wirklich relevant ist. Schiffsbaingenieure im 19. Jahrhundert und insbesondere William Froude fanden heraus, dass für an der Wasseroberfläche schwimmende Körper der Wellenwiderstand entscheidend ist. Ein Boot oder ein Schwimmer mit einer Geschwindigkeit v erzeugt Wellen mit einer Wellenlänge, die mit der Geschwindigkeit zunimmt.

Es hat sich gezeigt, dass längere Boote weniger Widerstand haben als kürzere. Deshalb werden die Segelboote bei Regatten in Längenklassen eingeteilt. Wird die Wellenlänge gleich oder länger als das Boot, steigt der Widerstand überpro-

Spektrum DER WISSENSCHAFT

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

Redakteionsleiter: Dr. Hartwig Hansen

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter

Linsmeier, Dr. Christoph Pöppé, Dr. Frank Schubert,

Dr. Adelheid Stahnke, Dr. Gerhard Trägeres;

E-Mail: redaktion@spektrum.de

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzemann,

Claus Schäfer, Natalie Schäfer

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

Katharina Werle

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

Assistentin des Chefredakteurs: Ann-Kristin Ebert

Redaktionsassistenz: Barbara Kuhn

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim: HRB 33814

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer

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

E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit:

Dr. Marcus Fischer, Dr. Eva Gottfried, Dr. Susanne Lipps-Breda,

Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser,

Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung gGmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Prof. Dr. Carsten Könneker.

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 Rechnungsstellung. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

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

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 36 vom 1.1.2015.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH.

Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen:

© 2015 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoomb, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

portional, und es besteht eine Art Schallmauer, die von Segelbooten nicht durchbrochen werden kann. Eine einfache Dispersionsgleichung beschreibt, wie die Wellenlänge mit der Geschwindigkeit zunimmt: $\lambda = 2\pi v^2/g$ (mit der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Setzt man die schnellste Schwimmgeschwindigkeit von etwa $v = 2,05 \text{ m/s}$ ein, so erhält man $\lambda = 2,69 \text{ m}$. Dies entspricht erstaunlich genau der Länge eines 2 Meter

großen Schwimmers mit ausgestrecktem Arm.

Was kann man daraus fürs Schwimmen lernen? Offensichtlich ist es gut, groß zu sein. In der Tat messen die Sprintkönige alle zwischen 1,90 m und 2 m. Da der Widerstand an der Wasseroberfläche größer ist als unter Wasser, bewegen sich die Schwimmer nach Start und Wende jeweils bis zu 15 m mit Delfinbeinschlag unter Wasser. Bei Brust und Delfin wird die Wasseroberfläche nur kurz zum Atmen durchbrochen, und ein Teil des Zugzyklus wird unter der Wasseroberfläche verbracht.

nehmen und das Buch »Mütter und andere« von Sarah Blaffer-Hrdy lesen. Dann werden sie feststellen, dass Edgar die These Blaffer-Hrdys missbräuchlich verwendet, ihr das Wort im Mund umdreht, vielleicht das Buch gar nicht gelesen hat und stattdessen nur das veraltete »Mutter Natur« kennt.

Blaffer-Hrdy geht nun auf der Basis der Großmutterhypothese sowie ihrer eigenen Forschung von der Matrilinearität der Menschheit als einzig natürlicher Lebensweise aus: »Ungeachtet dogmatischer Verlautbarungen, wonach Menschen für gewöhnlich ›eine patrilokale Familienstruktur besitzen‹, weil ›Söhne in traditionellen Gesellschaften in der Nähe ihrer Familien bleiben, während Töchter fortziehen‹, wird diese grundlegende Aussage über die menschliche Natur nicht von Daten über Menschen gestützt, die tatsächlich als Jäger-Sammler leben.«

Die Monogamie, hergestellt durch das theologisch vorgeschriebene Ritual der Ehe, ist eine Einrichtung des Patriarchats, die das Ziel hat, die Wahlfreiheit der Frauen zu unterdrücken. Nur durch Patrilokalität kann der Mann Monogamie herstellen, denn nur in seinem Haus können er, seine Eltern und Brüder »seine« Frau kontrollieren. Wäre dies schon vor zwei Millionen Jahren der Fall gewesen, wäre die Menschheit längst ausgestorben. Denn das Patriarchat erzeugt nicht nur die folgenreiche Überbevölkerung, sondern züchtet eine aggressive und psychisch gestörte Population heran.

Unterdrückte Wahlfreiheit der Frauen

Der Anthropologe und Zoologe Blake Edgar sieht in der Monogamie eine wichtige Voraussetzung zur Entwicklung des menschlichen Gehirns (»Stark als Paar«, April 2015, S. 34).

Gabriele Uhlmann, Braunschweig: Nach dem Lesen des Artikels bleibt mir nur zu hoffen, dass sich alle Leser den zugehörigen Literaturtipp zu Herzen

Der Zusammenhalt von Mann und Frau half, unsere Evolution voranzutreiben.

FOTODA / PAWEŁ OSÓSKA

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
oder per E-Mail: leserbriefe@spektrum.de

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe



DIE MARIONETTE

VON MICHAEL ADAM ROBSON

Er schaltete seinen Anzug ab, stieg hinaus auf den steinigen Boden, schob seinen Schutzhelm aus der Stirn und blinzelte hinauf. Eine böse Sonne brannte in einem schmutzigen Himmel. »Ich wette, dort, wo du herkommst, wird es nie so heiß. Muss angenehm sein.« Er sah finster auf seinen Begleiter hinunter. »Auch wenn es nicht real ist.«

Das Ding saß auf seiner Schulter wie eine mechanische Spinne und ignorierte ihn. Wahrscheinlich sah es in ihm eher ein abgerichtetes Haustier als eine Person. Der Mann zuckte die Schultern und überprüfte mit einem Scanner ein Stück Kabel auf Defekte. Wenigstens das Prüfgerät schien die kleine Roboter-spinne zu interessieren; sie krabbelte den Rücken des Mannes hinunter und seinen Arm entlang, wobei sich kleine Haftpolster in seine Haut drückten.

Er sollte zwei früher konkurrierende Netzwerke verbinden, irgendeine Fusionierung herstellen, mehr wusste er nicht. Menschen halfen solchen Maschinenwesen oft mit körperlichen Arbeiten, im Austausch für Software und virtuelle Güter.

»Komisch«, sagte der Roboter, ohne vom Scanner-Display aufzublicken. »Was du für eine virtuelle Welt hältst, ist für mich viel wirklicher als diese hier.«

»Hm.« Der Mann hockte sich nieder, nahm einen Stein und untersuchte ihn eingehend. »Bist du sicher? Das hier sieht real aus.«

Gelächter schwirrte aus der Maschine, und jetzt drehte sie sich zu ihm um. »Es ist schon real, nur ... eingeschränkt. Drinnen könnte ich irgendwo sein oder überall, könnte alles Mögliche tun und sein. Hier kann ich bloß einen plumpen kleinen Roboter abgeben, der mit dir Kabel verlegt.« Die Spinne fiel von seinem Arm und huschte am Kabel hinauf.

Er betrachtete ihre vielen Augen und fragte sich, ob sie ihn beleidigt hatte. »Hört sich an, als ob es dir hier nicht sehr gefällt.« Er warf den Stein weg und stand auf. »Warum bleibst du nicht daheim und überlässt die Routinearbeit den niedrigeren Lebensformen?«

»Manche bleiben lieber immer drinnen, aber ich meine, wir dürfen uns nicht von der physischen Welt isolieren. Außerdem finde ich nichts dabei, mir die Hände schmutzig zu machen.« An Stelle von Händen klapperte die Maschine mit dünnen Stahlbeinen.

Seltsame Vorstellung, dass dieses Ding in Wirklichkeit weder Hände, Beine noch einen Körper besaß; er sprach mit einer Marionette, mit einer Wegwerfhülle, in die die reale Intelligenz nach Belieben hineinschlüpfte und sie auch wieder verließ – genau wie Men-

schen mitunter einen Avatar einsetzen, um in ihrer Welt Arbeiten auszuführen.

»Und diese Arbeit ist wichtig!«, fuhr der Roboter fort. »Je mehr Infrastruktur wir hier draußen schaffen, desto größer wird mein Teil der Welt dort drinnen.«

»Also geht es um Grundbesitz, hab ich Recht?« Der Mann setzte sein bestes Maklerlächeln auf und wies auf die verbrannte Landschaft. »Ich habe gleich hier ein wunderschönes Angebot, mein Herr! Hoch motivierter Verkäufer!«

Die Maschine lachte; sie zeigte mehr Sinn für Humor als die Roboter, mit denen er bisher gearbeitet hatte. »Nicht Grundbesitz im üblichen Sinn. Mehr Raum im Inneren bedeutet mehr von mir. Ich kann meinen Geist erweitern, mich vermehren, wenn ich will.«

»Hier haben wir eine großartige Wohngegend, um eine Familie zu gründen! Wartet drinnen schon eine schöne Spinnenfrau auf dich?«

»Haha!« Die Metallbeine klapperten wieder. »Ich muss für dich seltsam aussehen. Altmodische Roboter sind meist humanoide, sie kopieren menschliches Verhalten, manche halten sich sogar für Menschen. Geschaffen nach dem Ebenbild unserer Schöpfer ... als wir uns noch nicht selbst schufen.«

»Vielleicht bin ich selbst ein Roboter und weiß es nur nicht!«

»Oh ... du weißt es nicht?« Alle Augen richteten sich jetzt auf ihn. »Du bist ein Roboter. Ein sehr frühes Modell, grob menschenähnlich. Mich wundert, dass du noch in Gebrauch bist.«

Sein Lächeln wurde schief. »Ha. Nun ...« Er breitete die Arme aus und sah an sich hinunter. »Mir kommt alles okay vor. Arme, Beine, Rumpf ... einfach ein großer, verschwitzter, haariger Mann.«

»So denkt ein Mensch, aber wie gesagt, ein künstlicher Geist hat mehr Möglichkeiten. Er könnte darauf programmiert sein, sich für menschlich zu halten, während er eigentlich auf sein rostiges Fahrgestell hinunterschaut. Er könnte Menschen sehen, wenn er andere alte Roboter anschaut, obwohl es vielleicht gar keine Menschen mehr gibt.«

Das Lächeln war ihm ganz vergangen. »Ich bin ein Mensch. Ich esse, trinke, gehe aufs Klo.«

»Wirklich? Ich habe heute nichts dergleichen an dir beobachtet. Wann warst du zuletzt auf dem Örtchen?«

Er dachte nach, konnte sich aber nicht erinnern.

»Selbst wenn es dir einfällt, wer sagt, dass die Erinnerung echt ist? Vielleicht wurde sie dir einprogrammiert. Vielleicht befinden wir uns nicht einmal jetzt in der realen Welt, vielleicht ist das nur eine weitere Simulation, die in

meiner Innenwelt abläuft. Ist das nicht möglich? Angesichts unendlicher Möglichkeiten ist es sogar wahrscheinlich. Jedenfalls wahrscheinlicher als ein Mensch und eine Maschine, die sich über Existenzfragen unterhalten.«

Der Mann schaute hinunter auf den Kunststoffscanner in seiner schmutzigen Hand und fühlte dessen Festigkeit. Er ließ seine Zunge über seine Zähne gleiten und prüfte den Geschmack. War es möglich? Die Maschine bot ihm keinen Gesichtsausdruck, den er deuten konnte. Lange herrschte Stille in der heißen Luft, dann erhob sich blechernes Gelächter. »Guck nicht so. Das war bloß ein Scherz. Du hast nach meiner Welt gefragt, ich wollte dir einen Eindruck von ihr vermitteln. Nichts ist real. Alles ist real.«

Er hätte die Spinne am liebsten zertritten. Schließlich lachte er mit. »An deinem Sinn für Humor musst du noch arbeiten.«

Am Abend plagte ihn in seiner stinkig heißen Wohnung eine unerklärliche Unruhe. Er ging ins Badezimmer, wusch sich das Gesicht und studierte sorgfältig den Ausdruck seiner blauen Augen im zersprungenen Spiegel.

Da er nicht hungrig war, ließ er das Abendessen ausfallen, ging gleich zu Bett und fiel in einen tiefen, traumlosen Schlaf. 

DER AUTOR

Michael Adam Robson ist Ingenieur und Künstler. Er lebt in Vancouver (Kanada).

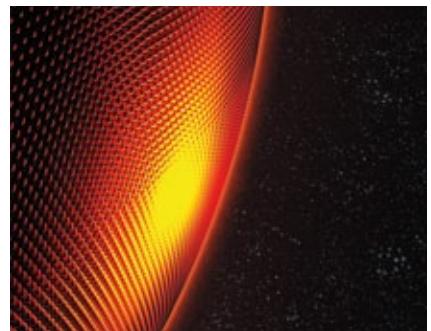
Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 517, S. 650, 29. Januar 2015



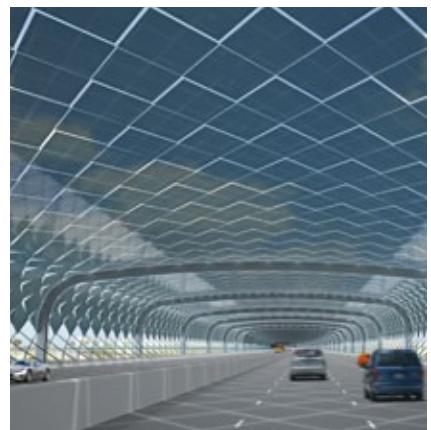
Epigenetik: Vererbung der anderen Art

Schädliche Einflüsse wie Stress oder Chemikalien können die Genaktivität auch ohne DNA-Mutation in nachfolgenden Generationen verändern – und dadurch Krankheiten verursachen.



Die Feuerwand am Horizont

Für das, was am Rand eines Schwarzen Lochs geschieht, liefern allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik sich widersprechende Vorhersagen. Eine Lösung dieses Problems könnte zugleich Wege aufzeigen, beide Theorien zu vereinen.



Die Straßen der 5. Generation

Ein geringer Material- und Instandsetzungsaufwand gehört zu den einfacheren Anforderungen an die Straßen der Zukunft. Zudem sollen sie umweltfreundlich sein, Strom für Elektrofahrzeuge erzeugen und vieles mehr können.

Mit speziellem Fettgewebe gegen Übergewicht?

Ein neu entdeckter Typ von Fettzellen kann zwischen dem Speichern und dem Verbrennen von Fett umschalten. Als Schalter dient unter anderem eine Substanz, die von Muskelzellen bei körperlicher Betätigung freigesetzt wird. Das eröffnet neue Optionen im Kampf gegen Übergewicht.

Der Nutzen sozialer Vielfalt

Auf den ersten Blick scheint eine Vielfalt ethnischer Herkunft und sexueller Orientierung nur Probleme zu schaffen. Doch tatsächlich lässt sich nachweisen, dass eine bunt gemischte Gruppe deutlich kreativer, gründlicher und fleißiger zusammenarbeitet als ein ethnisch und geschlechtlich völlig homogenes Team.

NEWSLETTER

Möchten Sie immer über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.de/newsletter

JETZT BESTELLEN: DAS SPEKTRUM-DER-WISSENSCHAFT-ABO mit exklusiven Extras



VERPASSEN SIE
KEINE AUSGABE
DES MAGAZINS!



WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK!

1. »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.
Weitere Vergünstigungen unter:
www.spektrum.de/aboplus

+ WUNSCHGESCHENK:

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

+ PÜNTLICHE LIEFERUNG:

Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.

+ KEINE MINDESTLAUFZEIT:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.



2. Spektrum-Jahrgangs-CD-ROM

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format.

So einfach erreichen Sie uns:

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

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



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



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