

Spektrum

der Wissenschaft

Welle oder Teilchen?

Ein klassisches
Quantenexperiment eröffnet neue
Blicke auf die Realität

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



- ASTRONOMIE** Ein Familienstammbaum für die Sonne
- MANIPULATION** Fake-Videos durch KI
- BIOMIMETIK** Haizähne als Vorbild für Zahnersatz

IHRE ANALYSEN:
UNENDLICH KOMPLEX
DIE CLOUD:
UNENDLICH SKALIERBAR



JETZT 250€
TESTGUTHABEN
SICHERN.

**OPEN TELEKOM CLOUD
MIT INTEGRIERTEM DATENSCHUTZ**

Die europäische Cloud-Alternative. Basierend auf OpenStack.
www.telekom.de/open-telekom-cloud



ERLEBEN, WAS VERBINDET.



EDITORIAL GEFÄHRLICHE FÄLSCHUNGEN

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Alle Filme lügen. Alle. Bereits die Schnitte ändern den Verlauf der dargestellten Zeit, selbst wenn der Streifen ein Mittendrin-dabei-Gefühl suggeriert. Zudem gaukelt das zweidimensionale Medium Film vor, es könne problemlos die dreidimensionale Wirklichkeit abbilden. Andere Verfälschungen der Wahrheit reichen von der Filmmaske (Verändern der Darsteller durch Schminken oder Prothetik) über Sound-Effekte (warum klingen Pistolenschüsse immer wie Kanonen?), Gefühlsmanipulation mittels Hintergrundmusik bis hin zur offensichtlichsten Flunkerei, den visuellen Spezialeffekten. Diese sind keineswegs eine Erfindung des modernen Blockbusters, sondern entstanden schon kurz nach der Geburtsstunde des Kinos. Ein sehr frühes Beispiel ist Georges Méliès' »Reise zum Mond« von 1902, in dem der französische Filmpionier ein Feuerwerk der damals verfügbaren Techniken wie Modellbau, Doppelbelichtung und Stop-Motion-Animation zündete.

Solchen Tricks sah man noch an, dass es sich um Fälschungen handelt, wobei sich die Technik mechanisch gesteuerter Puppen, so genannter Animatronics, fortlaufend verbesserte und 1993 mit »Jurassic Park« einen Höhepunkt erreichte. Dieser Film, in dem täuschend lebensechte Dinosaurier die Leinwand bevölkerten, markiert zudem den Durchbruch digitaler, also per Computer produzierter Spezialeffekte. Ihre Entwicklung war seit den 1980er Jahren mit wachsender Rechenleistung immer rasanter verlaufen, so dass die Resultate nun ebenfalls äußerst realitätsnah wirkten.

Was ist der nächste Schritt nach der erfolgreichen Kreation nicht existierender Lebewesen? Ganz einfach: das digitale Verändern existierender. Ein Beispiel kam bereits 1994 mit »Forrest Gump« in die Kinos, in Form eines gefälschten Händedrucks zwischen dem Schauspieler Tom Hanks und dem 1963 ermordeten US-Präsidenten J. F. Kennedy. Seitdem hat sich die Technik dramatisch weiterentwickelt, bis hin zum Transfer von Gesichtern längst verstorbener Schauspieler auf Kollegen wie in »Rogue One« (2016), in dem der britische Mime Peter Cushing auf diese Weise digital wiederbelebt wurde.

Leider werden solche Methoden nun aber zunehmend außerhalb der Unterhaltungsindustrie verwendet – um gefälschte Videos realer Personen herzustellen, die dann über soziale Medien wie Facebook verbreitet werden (siehe den Artikel ab S. 72). Das ermöglicht eine ganz neue Dimension von »Fake News«, untergräbt das Vertrauen in die Medien und erschüttert damit einen zentralen Stützpfeiler unserer demokratischen Gesellschaft. Denn wem kann man noch glauben, wenn man den eigenen Augen nicht mehr trauen darf?

Nachdenklich grüßt Ihr



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Biologie – Medizin – Hirnforschung 4.18 beleuchtet gesellschaftliche Diversität: von der Rolle von Frauen über den Vorteil sozialer Vielfalt bis hin zu Wegen aus der Armutsfalle.

IN DIESER AUSGABE



FREDERIKE HENTSCHEL
MIT FROL GEN, DES DAHLEBERG

GERARDUS 'T HOOFT

Im Interview mit **Spektrum** stellt der Physik-Nobelpreisträger ab S. 20 seine Interpretation der Quantenmechanik vor.



HELGE-OTTO FABRITIUS

Bisheriger Zahnersatz unterscheidet sich oft stark von echten Zähnen. Ab S. 46 beschreibt der MPI-Biologe zusammen mit zwei Industrieforschern naturnähere Ersatzmaterialien.



CHRISTOPH DÜLLMANN UND MICHAEL BLOCK

Der Kernchemiker und der Kernphysiker wollen die Struktur und Stabilität von Atomkernen besser verstehen. Dazu untersuchen sie extrem schwere Elemente (S. 54).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Die Erfindung des Buntstifts

Geburt eines
Neutronensternpaars

Pinguinsterben durch
Starkregen

Rückschlag bei
Krebs-Immuntherapie

Dauer eines
Quantensprungs

Ein Kleinplanet
namens Kobold

Genschere gegen
Stoffwechselstörung

Die blauen Augen
der Huskys

24 FORSCHUNG AKTUELL

Nobelpreis für Physiologie oder Medizin

Entfesselte Immunzellen
gegen Krebs

Nobelpreis für Physik

Auf den Spuren von
»Star Trek«

Nobelpreis für Chemie

Evolution im Reagenzglas

Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften

Innovation und Klima
als ökonomische Faktoren

37 SPRINGERS EINWÜRFE

Immer Ärger mit den Quanten

Die Deutung der Quanten-
physik bleibt umstritten.

62 SCHLICHTING!

Vielschichtige Umtriebe im Latte macchiato

Manche heiße Flüssigkeiten
mischen sich auf Umwegen.

12 QUANTENMECHANIK **KEIN AUSWEG AUS DER UNWIRKLICHKEIT**

Quantenobjekte sind bis zum Zeitpunkt der Messung weder Welle noch Teilchen – oder doch?

Von Anil Ananthaswamy

20 INTERVIEW **DAS UNIVERSUM ALS ZELLULÄRER AUTOMAT**

Serie: Große Forscher im Gespräch (Teil 2) Der niederländische Physik-Nobelpreisträger Gerardus 't Hooft erläutert seine Ideen zu einer neuen Interpretation der Quantenmechanik.

Von Manon Bischoff

38 ENDOMETRIOSE **GEWEBE AUF ABWEGEN**

Millionen Frauen leiden unter einer häufig verkannten Krankheit, bei der sich Zellen aus der Gebärmutter Schleimhaut im Körper ausbreiten und mitunter starke Schmerzen verursachen.

Von Jena Pincott

46 BIOMIMETIK **DIE NATUR ALS VORBILD**

Das Nachahmen von natürlichen Materialien und Prozessen soll zu besseren Pflegeprodukten und innovativen Zahnersatz-Materialien führen.

Von Helge Otto-Fabritius, Frederic Meyer und Joachim Enax

54 CHEMIE **INSEL DER SCHWERGEWICHTE**

Elemente jenseits des bekannten Periodensystems lassen sich herstellen, zerfallen aber extrem schnell wieder. Allmählich rücken jedoch theoretisch besonders stabile Kombinationen von Protonen und Neutronen in Reichweite.

Von Christoph E. Düllmann und Michael Block

64 ASTRONOMIE **DER STAMMBAUM DER SONNE**

Neue Forschungen decken die überraschende Vergangenheit unseres Zentralgestirns auf – und geben Hinweise auf seine voraussichtliche Zukunft.

Von Rebecca Boyle

72 MEDIEN **KLICKS, LÜGEN UND VIDEO**

Dank künstlicher Intelligenz ist es sehr einfach geworden, Videos zu fälschen. Damit gerät die Glaubwürdigkeit der Medien generell in Gefahr.

Von Brooke Borel

78 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **FLÄCHENMAGISCHE QUADRATE**

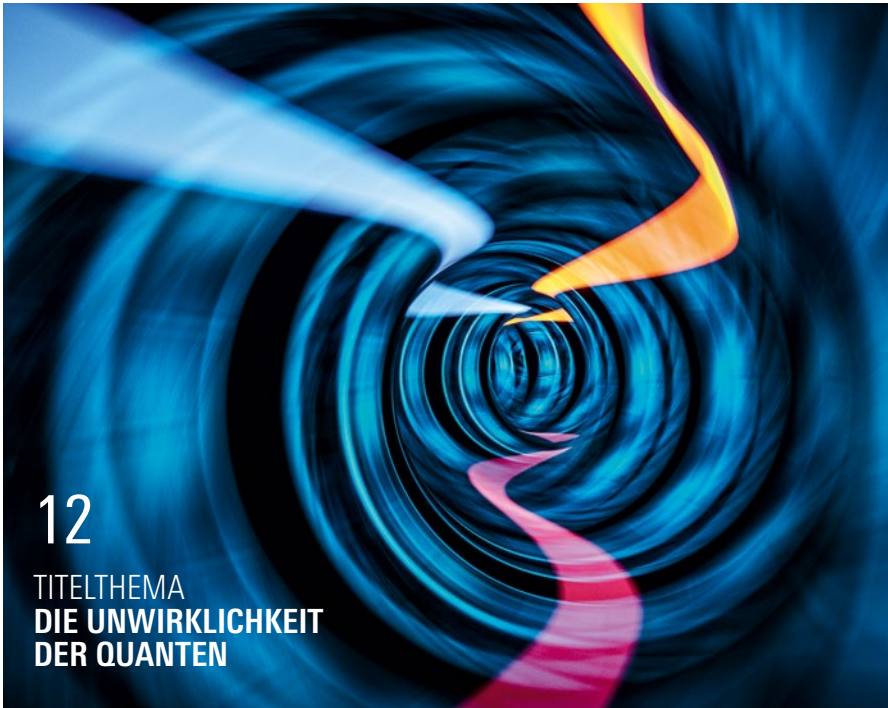
Die altherwürdigen magischen Quadrate haben neue, geometrisch definierte Geschwister bekommen.

Von Jean-Paul Delahaye

82 WIKINGER **PIONIERE IN EINER UNWIRTLICHEN WELT**

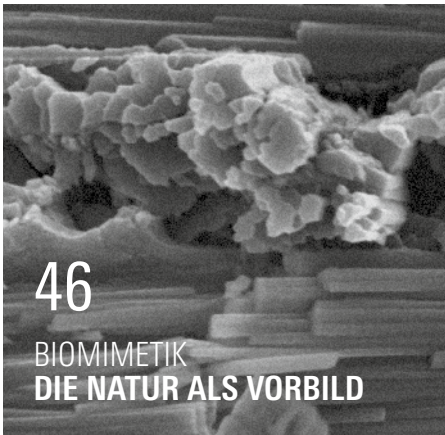
Serie: Migration (Teil 1) Ein halbes Jahrtausend nach der Einwanderung verließen die Nordmänner Grönland wieder. Warum?

Von Zach Zorich und Klaus-Dieter Linsmeier



12

TITELTHEMA
**DIE UNWIRKLICHKEIT
DER QUANTEN**



46

BIOMIMETIK
DIE NATUR ALS VORBILD



64

ASTRONOMIE
GESCHICHTE DER SONNE



72

MEDIEN
FAKE-VIDEOS



82

WIKINGER
**PIONIERS IN EINER
UNWIRTLICHEN WELT**

71 FREISTETTERS FORMELWELT

Es kommt doch auf die Größe an!

Warum Teleskope immer gigantischer werden.

88 REZENSIONEN

BBC: Die Welt der Raubkatzen

Julian Nida-Rümelin, Nathalie Weidenfeld:

Digitaler Humanismus

Alexander Demandt: Marc Aurel

Brian Cox, Jeff Forshaw:

Was wiegt das Universum?

92 IMPRESSUM

94 ZEITREISE

Vom indianischen Kampfgas zum Mini-Tornado in Berlin

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

Möglicherweise ein Abschiedsbrief

Liebe in Zeiten der interplanetaren Raumfahrt.

98 VORSCHAU

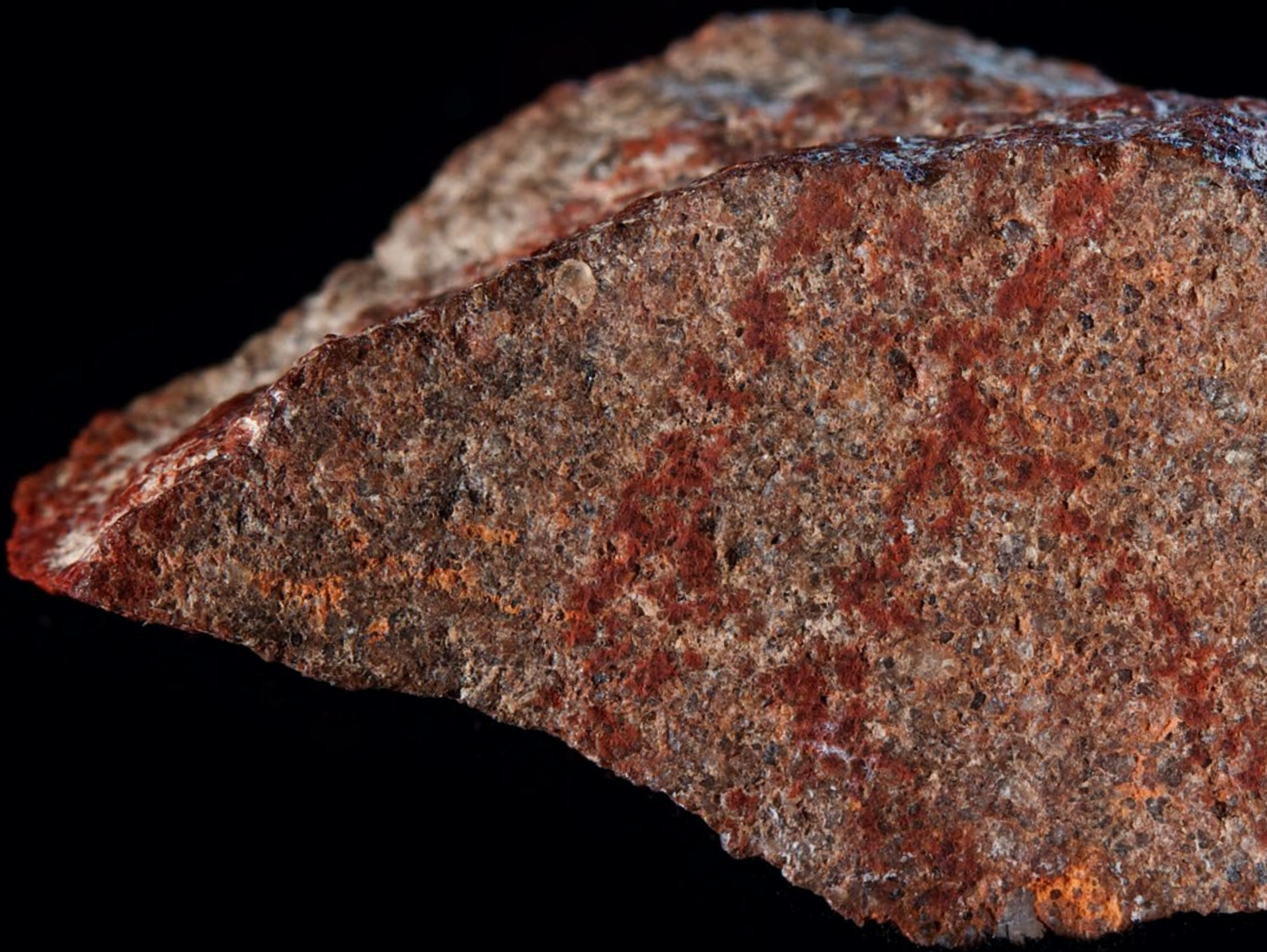
Titelbild:
gmaydos / Getty Images / iStock;
Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft



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

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

SPEKTROGRAMM



DIE ERFINDUNG DES BUNTSTIFTS

► Was uns die Maler der 73 000 Jahre alten Ockerstriche sagen wollten, ist leider nicht überliefert. Die gekreuzten Linien auf dem vier Zentimeter langen Steinchen sind jedoch der älteste Beleg dafür, dass unsere Ahnen mit Farbe malten. Selbst Zeichnungen der Neandertaler, die man in Spanien fand, sind Schätzungen zufolge 8 000 Jahre jünger. Und die berühmten Höhlenmalereien von Lascaux oder Altamira kommen gerade einmal auf die Hälfte des Alters der nun entdeckten Striche.

Der Fund stammt aus der südafrikanischen Blombos-Höhle. Hier ritzen Menschen bereits vor rund 100 000 Jahren abstrakte Zeichnungen auf Steine oder Ockerbrocken, wie frühere Entdeckungen zeigen. Jetzt ist klar, dass *Homo sapiens* dort auch mit Farbe hantierte: Wahrscheinlich malten die Künstler die roten Linien mit angespitzten Ockerstiften, wie Experimente der Forscher von der University of the Witwatersrand in Johannesburg nahelegen. Das Team vermutet, dass die Bemalung ursprünglich wohl über die Bruchkanten hinausging. Die Anschlussstücke sind aber bislang verschollen.

Nature 562, S. 115–118, 2018



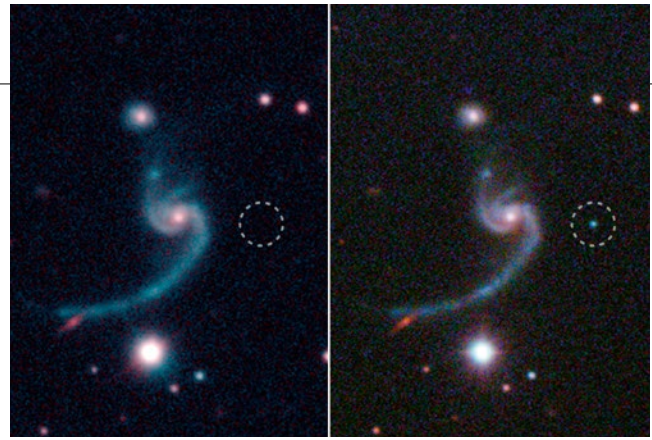
ASTROPHYSIK GEBURT EINES NEUTRONENSTERNPAARS

Neutronensterne vereinen auf einem Durchmesser von gerade einmal 20 Kilometern bis zum Doppelten der Masse unserer Sonne. Die extrem dichten Objekte entstehen, wenn ein Stern einer gewissen Größe am Ende seines Brennzyklus in sich zusammenfällt und seine Hülle in einer Supernova-Explosion abstößt.

Das Verblüffende: Astrophysiker haben in der Vergangenheit immer wieder Duos der Exoten aufgespürt, die sich auf

engen Bahnen umkreisen und manchmal sogar verschmelzen (siehe **Spektrum** Januar 2018, S. 58). Dabei müsste die Wucht der Supernovae die beiden eigentlich auseinandergeschleudert haben.

Wie schaffen es die Paare, zusammenzubleiben? Eine Gruppe um Kishalay De vom California Institute of Technology in Pasadena glaubt das Rätsel nun gelöst zu haben. Demnach bilden sich Neutronensternpaare aus Doppel-



SISS / CALTECH

Am 19. Oktober 2014 tauchte am Rand der Galaxie »IV Zw155« ein Punkt auf – das Licht einer Supernova.

sternsystemen, deren Sterne in vergleichsweise schwachen Explosionen vergehen. Das legt zumindest eine ungewöhnliche Supernova namens »iPTF

14gqr« nahe, deren Licht die Erde im Oktober 2014 erreichte. Sie fiel schwächer aus als gewöhnlich und verblasste überraschend schnell.

Offenbar explodierte hier ein Stern, der bereits einen großen Teil seiner Wasserstoff- und Heliumhülle verloren hatte. Ohne Gasmantel bleibt von einem Stern lediglich der nackte Kern übrig, dessen Kollaps zu einem Neutronenstern eine vergleichsweise schwache Supernova auslöst. Denkbar ist dieses Szenario aber nur, wenn der todgeweihte Stern von einem extrem kompakten und massereichen Partner umkreist wurde, vermutlich einem Neutronenstern. Nur solch ein Objekt könnte genug Schwerkraft aufbringen, um die Gashülle seines Partner gründlich abzusaugen.

Sowohl die Beobachtungsdaten von iPTF 14gqr als auch Computersimulationen passen am besten zu diesem Szenario, argumentieren die Forscher. Demnach brachte auch die erste der beiden Explosionen in dem Sternsystem, bei der der erste Neutronenstern entstand, nicht genug Kraft auf, um das Paar auseinanderzubringen.

Science 362, S. 201–206, 2018

POLARFORSCHUNG PINGUINSTERBEN DURCH STARKREGEN

Wenn Pinguine eine Kolonie in der Antarktis aufgeben, ist das meist ein langwieriger Prozess: Die Tiere wenden sich erst von ihren Brutstätten ab, wenn sich die Bedingungen über Jahrhunderte hinweg stetig verschlechtern haben, etwa durch die Ausdehnung eines nahen Gletschers oder kontinuierliche Abkühlung. Ein Team um Liguang Sun von der Chinesischen Universität der Wissenschaft und Technik in Hefei präsentiert nun Hinweise, dass Kolonien von Adeliepinguinen (*Pygoscelis adeliae*) auch viel schneller zu Grunde gehen können: Mehrere Brutstätten auf der Antarktischen Halbinsel seien binnen weniger Jahre aufgegeben worden.

Die Wissenschaftler haben hunderte mumifizierte Vögel an mehreren Fundorten geborgen und bei 14 Tieren Gewebeproben datiert. Das Team analysierte außerdem die Sedimente im Umfeld einiger Kadaverfunde. Die Befunde deuten darauf hin, dass die Kolonien vor 200 beziehungsweise 750

Jahren untergingen und dass es um den Todeszeitpunkt herum ungewöhnlich starke Regen- und Schneefälle gab. Insbesondere für junge Pinguine stellt schlechtes Wetter ein Problem dar: Ohne ausgeprägtes Federkleid können sie sich kaum vor Kälte schützen, die Sterblichkeitsrate steigt bei niedrigen Temperaturen entsprechend an. Viel Schnee erschwert zusätzlich den Nestbau der Vögel – und die Schneeschmelze schwemmt einige Zeit später bereits gelegte Eier hinfort.

Die Forscher machen besondere Wetterlagen für den rapiden Untergang der Kolonien verantwortlich. Bei Konstellationen vom Typ »zonale Welle 3« strömen große Mengen feuchter Luft von Norden her in Richtung Antarktis. Das Phänomen könnte infolge des Klimawandels wahrscheinlicher werden, mahnt die Gruppe. Fest steht, dass Pinguine auch heute immer wieder starken Regen- und Schneefälle ausgesetzt sind: 2013/14 starben in einer Kolonie auf der Pétreln-Insel sämtliche Jungtiere. Bezogen auf das gesamte Verbreitungsgebiet nimmt die Zahl der Adeliepinguine momentan jedoch zu.

J. Geophys. Res. Biogeosci.
10.1029/2018JG004550, 2018

MEDIZIN RÜCKSCHLAG BEI KREBS- IMMUNTHERAPIE

► Das Verfahren gilt als Hoffnungsträger bei der Behandlung von Krebserkrankungen des Blut bildenden Systems: Die CAR-T-Zell-Therapie programmiert bestimmte weiße Blutkörperchen des Immunsystems, die T-Zellen, derart um, dass diese chimäre Antigenrezeptoren (abgekürzt CAR) ausprägen. Letztere richten sich gezielt gegen krebsspezifische Oberflächenproteine.

Die so modifizierten Immunzellen sind wesentlich besser darin, Tumorzellen zu erkennen und zu bekämpfen. Seit 2011 behandeln Ärzte Krebspatienten mit dem Verfahren – teils mit beeindruckenden

Erfolgen. Wiederholt starben aber auch Menschen an den Nebenwirkungen der Immuntherapie.

Der Tod eines 20-jährigen Leukämiekranken wirft nun erneut einen Schatten auf das innovative Verfahren: Er starb neun Monate nach einer CAR-T-Zell-Behandlung – und zwar weil diese neben den T-Zellen auch eine einzelne Tumorzelle veränderte. Das habe bei dem jungen Mann zu einem Rückfall geführt und ihn schließlich getötet, berichten Mediziner um Marco Ruella von der University of Pennsylvania.

Bei der CAR-T-Zell-Therapie werden einer Blutprobe des Patienten zunächst T-Zellen entnommen. Als Nächstes setzt man sie einem Virus aus, das neues Genmaterial in sie einführt. Dadurch erkennen die T-Zellen Tumorzellen und

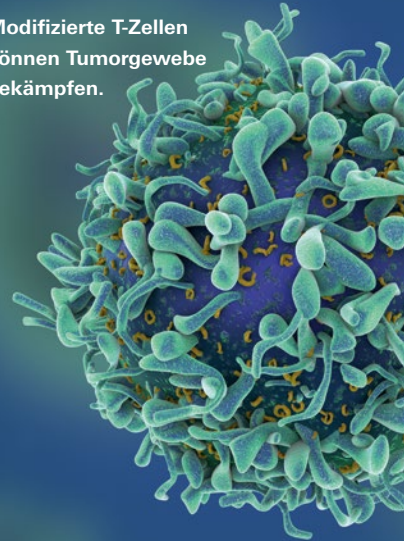
greifen diese an. Schließlich injiziert der Arzt die modifizierten weißen Blutkörperchen dem Patienten wieder.

In der ursprünglichen Blutprobe schwimmen oft auch vereinzelte Krebszellen, die normalerweise während des Verfahrens zu Grunde gehen oder von den modifizierten T-Zellen abgetötet werden. Es kann jedoch passieren, dass das Virus nicht nur das Erbgut der Immunzellen verändert, sondern auch das der Tumorzellen. In der Praxis komme das vermutlich nur extrem selten vor, betonen die Mediziner um Ruella. Wenn es passiert, können die Folgen aber fatal sein: Das Virus könne die Krebszellen gewissermaßen unsichtbar für die scharfgeschalteten T-Zellen machen, schreiben die Wissenschaftler. Wie genetische

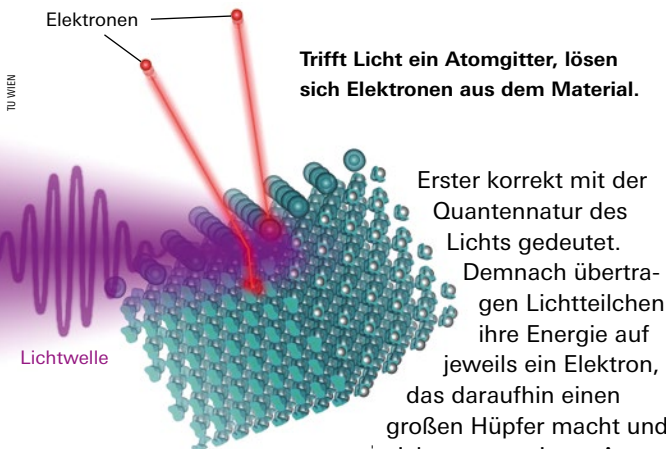
Analysen belegen, reichte im Fall des verstorbenen 20-Jährigen bereits eine einzige modifizierte Krebszelle, um die zunächst erfolgreich bekämpfte Erkrankung zurückkehren zu lassen.

Nat. Med. 24, S. 1499–1503, 2018

Modifizierte T-Zellen können Tumorgewebe bekämpfen.



CGTOOLBOX / GETTY IMAGES / ISTOCK



Trifft Licht ein Atomgitter, lösen sich Elektronen aus dem Material.

Erster korrekt mit der Quantennatur des Lichts gedeutet. Demnach übertragen Lichtteilchen ihre Energie auf jeweils ein Elektron, das daraufhin einen großen Hüpfen macht und sich so von seinem Atomkern trennen kann.

Nun hat ein deutsch-österreichisches Physiker-Team um Marcus Ossiander von der Technischen Universität München die genaue Dauer des Effekts in Wolfram bestimmt. Da sich der Sprung des Elektrons auf der kaum greifbaren Zeitskala von wenigen Attosekunden

(milliardstel Milliardstel-sekunden) abspielt, tasteten sich die Forscher auf einem Umweg an die Messung heran. Sie berechneten zunächst die Zeit, die ein Laser benötigt, um ein Elektron aus einem Heliumatom zu lösen. Dieses ist vergleichsweise einfach aufgebaut, weshalb Physiker die Begegnung von Lichtteilchen und Atom sehr genau am Computer simulieren können – bei Atomen in Festkörpern ist das nicht möglich.

Anschließend vermaß das Team den Photoeffekt in einem Jodgas – der zuvor ermittelte Wert bei Helium diente hier als Referenzwert, dank dem sich die absolute Zeitdauer ermitteln ließ. Das wiederum ermöglichte das eigentliche

Experiment: Die Gruppe brachte Jodmoleküle auf die Oberfläche eines Wolfram-Blocks auf und beschoss diesen mit ultrakurzen Laserpulsen.

Die Strahlung löste zunächst die Elektronen des Jods heraus, was den Start der Messung markierte. Von da an stoppten die Wissenschaftler die Zeit, bis auch die Wolfram-Elektronen die Messgeräte erreichten. Letztlich hing die Dauer des Photoeffekts vom Ursprungszustand der Ladungsträger ab: Von den inneren Schalen um den Atomkern benötigten Elektronen 100 Attosekunden. Die Leitungselektronen der äußeren Schalen hingegen hüpfen in 45 Attosekunden in die Freiheit.

Nature 561, S. 374–377, 2018

PHYSIK DAUER EINES QUANTENSPRUNGS

► Trifft energiereiche Strahlung auf Metalle oder Halbleiter, lösen sich Elektronen aus deren Oberfläche. Albert Einstein hatte diesen »photoelektrischen Effekt« 1905 als

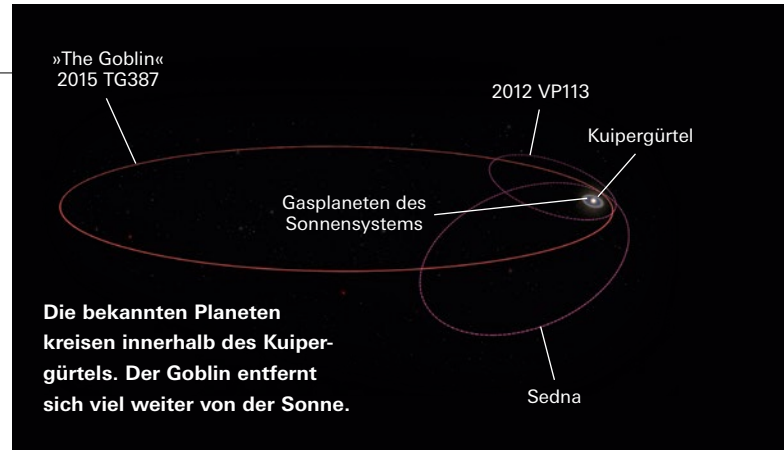
ASTRONOMIE EIN KLEINPLANET NAMENS KOBOLD

► Astronomen haben einen weiteren Kleinplaneten am Rand des Sonnensystems entdeckt. Das Objekt mit dem wissenschaftlichen Namen »2015 TG387« misst rund 300 Kilometer und benötigt etwa 40 000 Jahre für einen Umlauf um die Sonne. An seinem sonnennächsten Punkt ist der Himmelskörper 65 Astronomische Einheiten (AE; Abstand der Erde zur Sonne) von unserem Zentralgestirn entfernt – gut doppelt so weit wie Pluto.

Bemerkenswert an dem Objekt mit dem Spitznamen »The Goblin« (englisch: der Kobold) ist sein extrem lang gestreckter Orbit, auf dem

er sich zeitweise bis zu 2300 AE von der Sonne entfernt. Damit handelt es sich aus Sicht von Experten um den dritten bisher entdeckten größeren Himmelskörper aus der inneren Oortschen Wolke, einer weit ausgedehnten, sphärischen Ansammlung von Kometen und anderen Objekten. Sie werden nicht mehr wesentlich von der Schwerkraft der acht bekannten Planeten beeinflusst. Bereits 2003 hatten Forscher den Zwergplaneten Sedna entdeckt, und auch der Asteroid 2012 VP113 zählt zu dieser Gruppe.

2015 TG387 treibt momentan mit rund 80 AE



Entfernung vergleichsweise nah an der Erde durchs All. Das kleine, lichtschwache Objekt geriet 2015 vor die Linse des japanischen Subaru-Teleskops auf dem Mauna Kea in Hawaii. In den darauf folgenden Jahren konnten die Astronomen um Scott Sheppard von der Carnegie Institution for Science in Washington D. C. seine Bahn bestimmen. Das Team durchsucht die Außenbezirke des Sonnensys-

tems nach Hinweisen auf den hypothetischen »Planeten X«, der nach Einschätzung vieler Astrophysiker dort ebenfalls seine Bahnen ziehen müsste. Nach Aussage von Sheppard und seinen Kollegen ist der Orbit des Goblins mit der Existenz des bisher unentdeckten Gasplaneten vereinbar, einen Beweis liefere er allerdings nicht.

ArXiv 1810.00013, 2018

ILLUSTRATION BY ROBERTO MOLAR, CANDIANISA AND SCOTT SHEPPARD. COURTESY OF CARNEGIE INSTITUTION FOR SCIENCE. BEARBEITUNG SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

MOLEKULARBIOLOGIE GENSCHERE GEGEN STOFFWECHSEL- STÖRUNG

► Die Phenylketonurie gehört zu den häufigsten angeborenen Stoffwechselerkrankungen, in Deutschland leidet rund jedes 10 000. Neugeborene darunter. Die betroffenen Säuglinge können die Aminosäure Phenylalanin nicht abbauen, was zu schweren psychomotorischen Entwicklungsstörungen einschließlich Epilepsie und einem verkleinerten Schädelumfang führen kann.

Die Krankheit tritt auf, wenn sowohl die Mutter als auch der Vater mutierte Varianten des Gens vererben, das für das Enzym Phenylalaninhydroxylase (Pah) kodiert. Dieses setzt normalerweise Phenylalanin um, kann die

Fähigkeit aber infolge solcher Genmutationen verlieren. Die Symptome der Phenylketonurie lassen sich zwar durch eine eiweißarme Diät mindern, aber heilen kann man die Stoffwechselstörung bisher nicht.

Eine Studie von Forschern um Gerald Schwank von der ETH Zürich weckt nun Hoffnung, dass dies in Zukunft möglich sein könnte: Die Mediziner haben bei vier Labormäusen mit Hilfe der CRISPR/Cas9-Genschere das Erbgut an der entscheidenden Stelle repariert, wodurch die Pah-Enzyme in der Leber der Tiere wieder ihre normale Funktion aufnahmen. Dazu erweiterten die Wissenschaftler das CRISPR/Cas9-System um das Enzym Cytidineaminase. Es öffnet den DNA-Doppelstrang an der richtigen Stelle und wandelt ein C-G-

Basenpaar in das Paar T-A um, das dort bei gesunden Individuen steht. Diese Abwandlung der Methode habe bei Mäusen eine deutlich höhere Erfolgsrate gehabt als das klassische CRISPR/Cas9-Verfahren, berichten die Forscher. Man habe bis zu 63 Prozent der fehlerhaften Gene in der Leber der Nagetiere reparieren können.

Ob mit der Methode auch Menschen behandelt werden können, ist momentan noch unklar: Erst muss sich das Verfahren bei anderen Tieren bewähren. Auch müssen die Mediziner überprüfen, ob die Genschere – oder das Virus, mit dem diese in die Zellen gebracht wird – unerwünschte Nebenwirkungen herbeiführen, etwa indem sie andere, potenziell gefährliche Mutationen auslösen.

Nat. Med. 24, S. 1519–1525, 2018

BIOLOGIE DIE BLAUEN AUGEN DER HUSKYS

► Sibirische Huskys haben oft blaue Augen, und die auffällige Eigenschaft wird mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeprägt, sofern es im Erbgut der Tiere vorliegt. Forscher um Adam Boyko von der Cornell University und der Bostoner DNA-Analyse-Firma Embark Veterinary wollen der Ursache dafür nun näher gekommen sein.

Bisher war offen, ob die blauen Augen bei Huskys ähnlich wie beim Menschen zu Stande kommen: durch eine verstärkte Einlagerung von Farbpigmenten in die Regenbogenhaut

(Iris), die sich infolge einer Genmutation zuerst in Europa entwickelt hat. So spielt bei blauäugigen Menschen die Erbanlage für ein Protein namens OCA2 eine Rolle, das den Transport des Melaninpig-

Die blauen Augen von Huskys stellen Genetiker noch immer vor ein Rätsel.



UNSPLASH / ELLIE LORD (UNSPLASH.COM/PHOTOS/2AEB6GY1HD)

mentvorläufers Tyrosin in die Iris regelt. Laut der Analyse des Teams um Boyko wirkt bei den Hunden vermutlich ein anderer Mechanismus: Die Forscher haben das Erbgut von 6070 Vierbeinern analysiert, deren Halter außerdem ein Foto ihres Tiers online hinterlegten. Bei vielen der blauäugigen Huskys in der Datenbank liege ein DNA-

Abschnitt im Chromosom 18 nahe dem Gen *ALX4* verdoppelt vor, berichten die Forscher. Das Gen spielt bei der Entwicklung des Auges eine Rolle. Und dieselbe Abschnittsverdopplung tritt ebenfalls bei einer anderen Hunderasse auf, dem blauäugigen Australian Shepherd.

Warum die Genomveränderung bei Huskys zu blauen Augen führt, ist allerdings unklar. In Einzelfällen sind auch Hunde mit der Genverdopplung braunäugig. Es müssen also weitere, bisher unbekannte Faktoren die Farbgestaltung beeinflussen, glauben die Genetiker. Sie wollen nun weitere Analysen durchführen.

PLoS Genetics 10.1371/journal.pgen.1007648, 2018



Ein Geschenk, das ankommt!

Mit einem **Spektrum**-Geschenkgutschein hat der Beschenkte die freie Wahl: ob Abonnement, Einzelhefte oder Kalender, ob Print- oder Digitalprodukte. In unserem Onlineshop www.spektrum.de/shop bieten wir eine große Auswahl an.

spektrum.de/aktion/gutscheine

UNSPLASH / JONAKIM HONKASALO (https://unsplash.com/photos/944h3trg6ll)


QUANTENMECHANIK KEIN AUSWEG AUS DER UNWIRKLICHKEIT

Ein berühmtes Experiment schien zu beweisen: Quantenobjekte besitzen bis zum Zeitpunkt der Messung keine inneren Eigenschaften. Drei Forscher sind nun allerdings auf ein Schlupfloch gestoßen, das solche »verborgenen Variablen« zulassen könnte – während andere sich aufmachen, die Regeln der Quantenphysik doch noch zu retten.



Anil Ananthaswamy ist Wissenschaftsjournalist und Buchautor. Sein Buch »Through Two Doors at Once« ist im August 2018 erschienen und dreht sich um die Geschichte und die moderne Bedeutung des Doppelspaltexperiments.

» [spektrum.de/artikel/1603740](https://www.spektrum.de/artikel/1603740)



Welchen von vielen möglichen Pfaden ein Lichtteilchen einschlägt, bleibt oft im Dunkeln.

► Der theoretische Physiker John Wheeler sprach einmal vom »großen, rauchenden Drachen«, um ein Lichtteilchen zu beschreiben, dass sich von einer Quelle zu einem Detektor bewegt. »Das Maul des Drachen ist scharf, damit beißt er in den Detektor. Seine Schwanzspitze ist scharf, dort ist die Quelle«, schrieb Wheeler. Das Photon besitzt also sowohl am Anfang als auch am Ende eine eindeutig definierbare Realität. Doch dazwischen ist der Körper des Drachen unwirklich, gewissermaßen in Nebel gehüllt. »Es lässt sich nichts darüber aussagen, wie der Drache in diesem Bereich aussieht oder was er dort macht.«

Elementare Quantenphänomene sind nicht real, solange wir sie nicht beobachten – diese von Wheeler vertretene philosophische Position wird als Antirealismus bezeichnet. In der klassischen Sichtweise dagegen besitzen Objekte immer eindeutige intrinsische Eigenschaften. Wheeler entwarf ein Experiment, das zeigen sollte, wie ein Verharren auf dem klassischen Standpunkt unweigerlich zu der Schlussfolgerung führt, die Zukunft beeinflusse die Vergangenheit. Ausgehend von der Absurdität solcher Zeitreisen wurde Wheelers Experiment zu einem Stützpfiler des Antirealismus auf der Quantenebene.

Doch im Mai 2018 fanden Rafael Chaves, Gabriela Barreto Lemos und Jacques Pienaar vom Internationalen Institut für Physik in Natal, Brasilien, ein Schlupfloch. Sie zeigten, dass sich Wheelers Experiment unter bestimmten Voraussetzungen mit einem klassischen Modell erklären

lässt, in dem das Photon intrinsische Eigenschaften besitzt. Die Forscher gaben dem Drachen also einen definierten Körper, der jedoch dem mathematischen Formalismus der Standardquantenmechanik verborgen bleibt.

Die Physiker um Teamleiter Chaves schlugen eine kleine Veränderung an Wheelers Experiment vor, mit der sich dieses Schlupfloch überprüfen lassen sollte. Eifrig versuchten sofort drei Arbeitsgruppen, das modifizierte Experiment durchzuführen. Ihre im Juni 2018 publizierten Ergebnisse lassen sich, so die Forscher, mit klassischen, den Realismus verfechtenden Modellen nicht sinnvoll erklären. Die Quantenmechanik mag seltsam sein, aber sie liefert trotzdem immer noch die einfachste Erklärung.

Wheeler entwarf sein Experiment 1983, um eines der wichtigsten konzeptionellen Rätsel der Quantenmechanik zu beleuchten: den Welle-Teilchen-Dualismus. Quantenobjekte verhalten sich entweder wie Teilchen oder wie Wellen, aber niemals beides zur selben Zeit. Sie scheinen keine inhärente Realität besitzen, solange sie nicht beobachtet werden (siehe »Die Realität im Doppelspaltversuch«, S. 16). »Physiker ringen seit einem Jahrhundert mit dem Welle-Teilchen-Dualismus als einem essenziellen, seltenen Bestandteil der Quantentheorie«, kommentiert David Kaiser, der als Physiker und Wissenschaftshistoriker am Massachusetts Institute of Technology in den USA tätig ist. »Die Idee ist sogar älter als andere ungewöhnliche Bestandteile der Quantentheorie, wie Heisenbergs Unschärferelation und Schrödingers Katze.«

Das Phänomen lässt sich besonders gut bei einer speziellen Form des bekannten Doppelspaltexperiments beobachten, dem Mach-Zehnder-Interferometer. Dabei senden die Forscher ein einzelnes Photon auf einen halbdurchlässigen Spiegel, einen Strahlteiler. Das Photon wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit reflektiert oder durchgelassen, kann also zwei mögliche Wege nehmen (siehe »Kausalität auf den Kopf gestellt«, rechte Seite). Es läuft

Denkt man klassisch, wäre das Photon in der Zeit zurückgereist und hätte seinen Charakter verwandelt

entweder entlang Weg 1 oder Weg 2 und trifft entsprechend mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf Detektor D1 oder Detektor D2. Das Photon agiert dabei als einzelnes Objekt und zeigt uns seine teilchenhafte Natur.

An einer Stelle kreuzen sich die Wege 1 und 2, und dort können wir einen zweiten Strahlteiler platzieren. Das ändert die Situation völlig: Bei diesem Aufbau des Experiments läuft das Photon gleich einer Welle entlang beider Wege gleichzeitig. Diese treffen bei dem zweiten Strahlteiler wieder kurz aufeinander. Der Aufbau lässt sich so konfigurieren, dass sich der Anteil der Wellen, der sich weiter in Richtung von D1 bewegt, konstruktiv überlagert, also Wellenberg auf Wellenberg trifft. Der Pfad in Richtung D2 erzeugt im Gegensatz dazu destruktive Interferenz. Dann registrieren die Forscher das Photon stets bei D1 und niemals bei D2. Nun offenbart das Photon also seinen wellenartigen Charakter.

Geschickt sabotierte Realität

Wheelers geniale Problemstellung: Was passiert, wenn wir die Entscheidung, ob wir einen zweiten Strahlteiler einbauen, verzögern? Nehmen wir an, das Photon läuft in ein Interferometer hinein, in dem es nur den ersten Strahlteiler gibt. Dann sollte es sich wie ein Teilchen verhalten. Wir können dann jedoch den zweiten Strahlteiler in der allerletzten Nanosekunde doch noch einbauen, während das Photon bereits auf dem Weg ist. Sowohl Theorie als auch Experiment zeigen, dass das Photon, das sich doch ursprünglich wie ein Teilchen verhalten hätte und somit entweder D1 oder D2 erreichen sollte, sich gewissermaßen umentscheidet, jetzt als Welle in Erscheinung tritt und nur noch von D1 registriert wird. Damit das passieren kann, muss es aber beide Pfade gleichzeitig genommen haben und nicht entweder den einen oder den anderen. Denkt man klassisch, dann sieht es so aus, als wäre das Photon als Reaktion auf den veränderten Versuchsaufbau in der Zeit zurückgereist und hätte am Anfang des Experiments seinen Charakter von Teilchen in Welle verwandelt.

Eine Möglichkeit, eine solche Retrokausalität zu vermeiden, ist es, dem Lichtteilchen jede intrinsische Realität abzuspochen. Dann wird das Photon erst durch die Messung real. In diesem Fall gibt es nichts, was rückwirkend verändert werden müsste.

So ein Antirealismus kommt bei der unter Physikern beliebten Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik vor. Dieser verpasste die Arbeit von Chaves einen kräftigen Schlag, zumindest bezogen auf das Wheeler-Experiment. Chaves' Team wollte kontraintuitive Aspekte der Quantenmechanik mit Hilfe neuer Ideen – den so genannten kausalen Modellen – erklären. Solche Ansätze haben im Lauf

AUF EINEN BLICK NEBLIGE PFADE DER QUANTEN

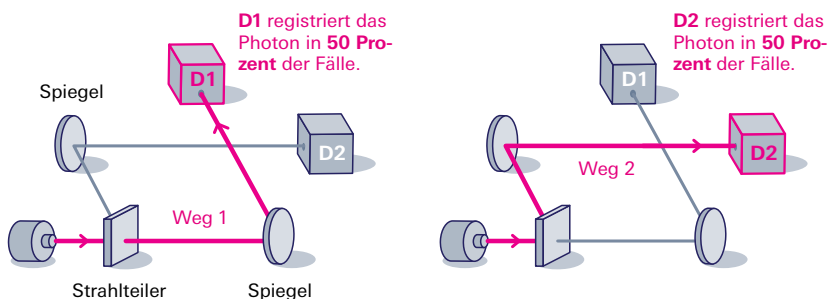
- 1** Elementare Quantenphänomene werden erst real, wenn wir sie beobachten. Sonst müsste die Zukunft die Vergangenheit beeinflussen. Das ist die Erkenntnis aus einem trickreichen Experiment.
- 2** Physiker zeigten jetzt, dass sich die Ergebnisse unter bestimmten Voraussetzungen mit einem klassischen Modell erklären lassen. Bei diesem würden die Quantenobjekte stets gewisse Eigenschaften besitzen, die uns lediglich nicht zugänglich wären.
- 3** Mehrere Gruppen von Experimentalphysikern haben dieses Szenario daraufhin im Labor überprüft. Die bekannte Quantenmechanik scheint sich dabei zu behaupten – einige Unsicherheiten bleiben jedoch bestehen.

Kausalität auf den Kopf gestellt

Ein Experiment mit »verzögerter Entscheidung« (Englisch: delayed choice) zeigt, wie wechselhaft der Charakter eines Lichtteilchens ist.

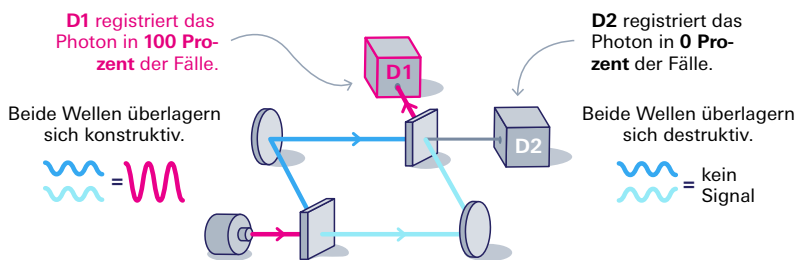
Wenn das Photon ein Teilchen ist

Von einer Quelle ausgehend nimmt ein Teilchen hinter einem Strahlteiler entweder Weg 1 oder Weg 2 und erreicht entsprechend Detektor D1 oder Detektor D2.



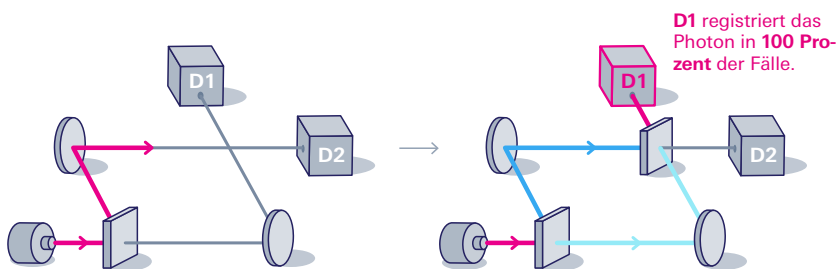
Wenn das Photon eine Welle ist

Mit einem zweiten Strahlteiler verhält sich das Photon wie eine Welle, die sich am ersten Strahlteiler aufspaltet. Am zweiten Strahlteiler kommen die Wellen wieder zusammen. Das Photon landet stets bei ein und demselben Detektor.



Verzögerte Entscheidung

Anfangs ist nur ein Strahlteiler im Versuchsaufbau. Das Photon sollte sich wie ein Teilchen verhalten. Erst während es die Apparatur durchläuft, kommt ein zweiter Strahlteiler hinzu. Dadurch wird das Photon schlagartig eine Welle – als hätte es von Beginn an beide Wege genommen.



Schlussfolgerung: Entweder sendet das Einfügen des zweiten Strahlteilers ein Signal rückwärts durch die Zeit, um das anfängliche Verhalten des Lichtteilchens zu beeinflussen, oder Photonen besitzen keine definierten intrinsischen Eigenschaften, solange sie nicht beobachtet werden.

Die Realität im Doppelspaltversuch

Für eine Demonstration, welche die Vorstellungen des großen Isaac Newton über die Natur des Lichts umstürzen sollte, war sie verblüffend einfach ausgelegt. Sie könne »mit großer Leichtigkeit wiederholt werden, wo immer die Sonne scheint«, beschrieb der englische Physiker Thomas Young im November 1803 den Mitgliedern der Royal Society in London das, was heute als Doppelspaltexperiment bekannt ist. Young hatte einen eleganten Versuch entwickelt, um die wellenförmige Natur des Lichts zu zeigen. Er widerlegte damit Newton, der meinte, es würde aus Korpuskeln genannten Teilchen bestehen.

Etwa 100 Jahre später allerdings wurde mit der Geburt der Quantenphysik klar, dass Licht tatsächlich aus winzigen, unteilbaren Energieeinheiten oder »Quanten« besteht, den Photonen. Was passiert, wenn man nun Youngs Experiment mit einzelnen Photonen oder den Bausteinen herkömmlicher Materie wie Elektronen und Neutronen durchführt? Dann wirft das grundlegende Fragen über die Natur der Realität auf. In der modernen Variante von Youngs Experiment fallen einzelne Licht- oder Materieteilchen auf zwei Spalte in einer sonst undurchsichtigen Barriere. Auf der anderen Seite befindet sich ein Detektor, der die Ankunft der Partikel registriert, beispielsweise eine fotografische Platte. Nach klassischer Sichtweise sollten einzelne Teilchen, welche die Schlitze passieren, hinter diesen auf den Detektor treffen und damit nach und nach zwei Hauptsignale verursachen.

Das tun sie nicht. Vielmehr bilden sich auf dem Bildschirm abwechselnd helle und dunkle Streifen. Solche Interferenzmuster entstehen im Allgemeinen, wenn sich mehrere Wellen überlagern, und sie waren auch das Ergebnis von Youngs ursprünglichem Experiment. Wenn

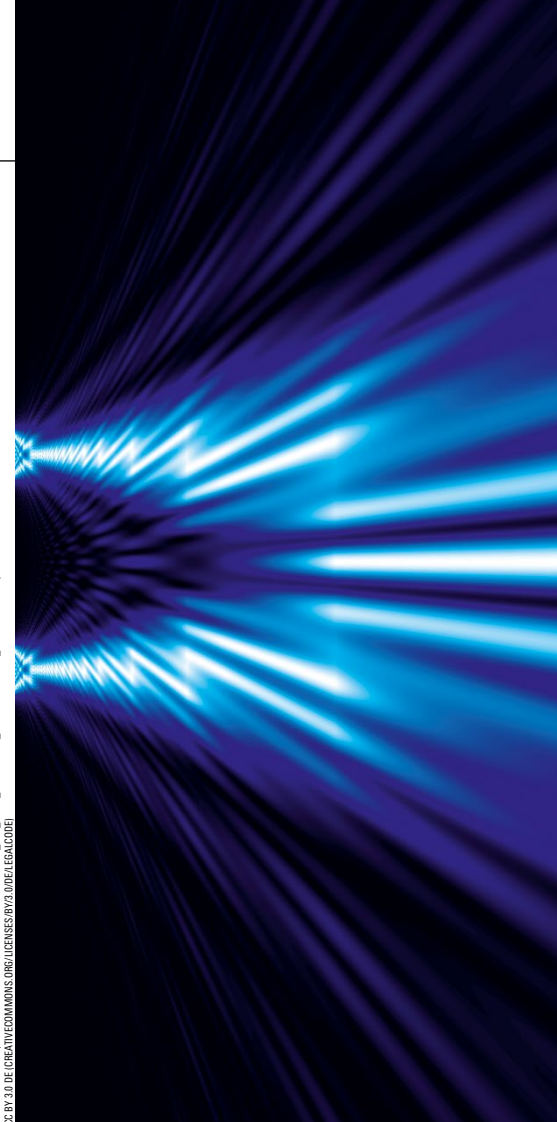
die Berge einer Welle auf die Berge einer anderen treffen, führt das zur konstruktiven Interferenz (helle Bänder); falls sie auf Wellentäler stoßen, ist die Interferenz destruktiv (Dunkelheit). Hier aber läuft immer nur ein einziges Photon durch das Gerät, und es scheint darum so, als ob jedes Lichtteilchen beide Spalte auf einmal durchläuft und mit sich selbst interferiert. Das ergibt im Rahmen der klassischen Physik keinen Sinn.

Zwischen Welle und Teilchen

Mathematisch gesehen ist das, was durch beide Spalte geht, kein physikalisches Teilchen und keine klassische Welle, sondern eine so genannte Wellenfunktion – eine abstrakte mathematische Beschreibung für den Zustand des Photons, in dem Fall seine Position. Sie verhält sich zunächst wie eine Welle: Sie trifft die beiden Spalte, von deren anderer Seite jeweils neue Wellen ausgehen, die sich ihrerseits ausbreiten und dabei miteinander interferieren. Die derart kombinierte Wellenfunktion liefert dann die Wahrscheinlichkeiten für die Orte auf dem Schirm, an denen das Photon detektiert werden könnte.

An den Stellen, wo die beiden Wellenfunktionen konstruktiv interferieren, wird man das Photon mit hoher Wahrscheinlichkeit antreffen. In Regionen mit destruktiver Interferenz sind die Chancen dafür hingegen gering. Die Messung – in dem Fall die Wechselwirkung mit der fotografischen Platte – lässt die Wellenfunktion kollabieren, wie es im Sprachgebrauch der Quantenmechanik heißt. Während sie zuvor noch über den gesamten Raum ausgebreitet war, erhält sie im Moment der Messung dort ein Maximum, wo sich das Photon offenbart.

Dieser messungsbedingte Kollaps der Wellenfunktion hat viele konzeptuelle Schwierigkeiten in der

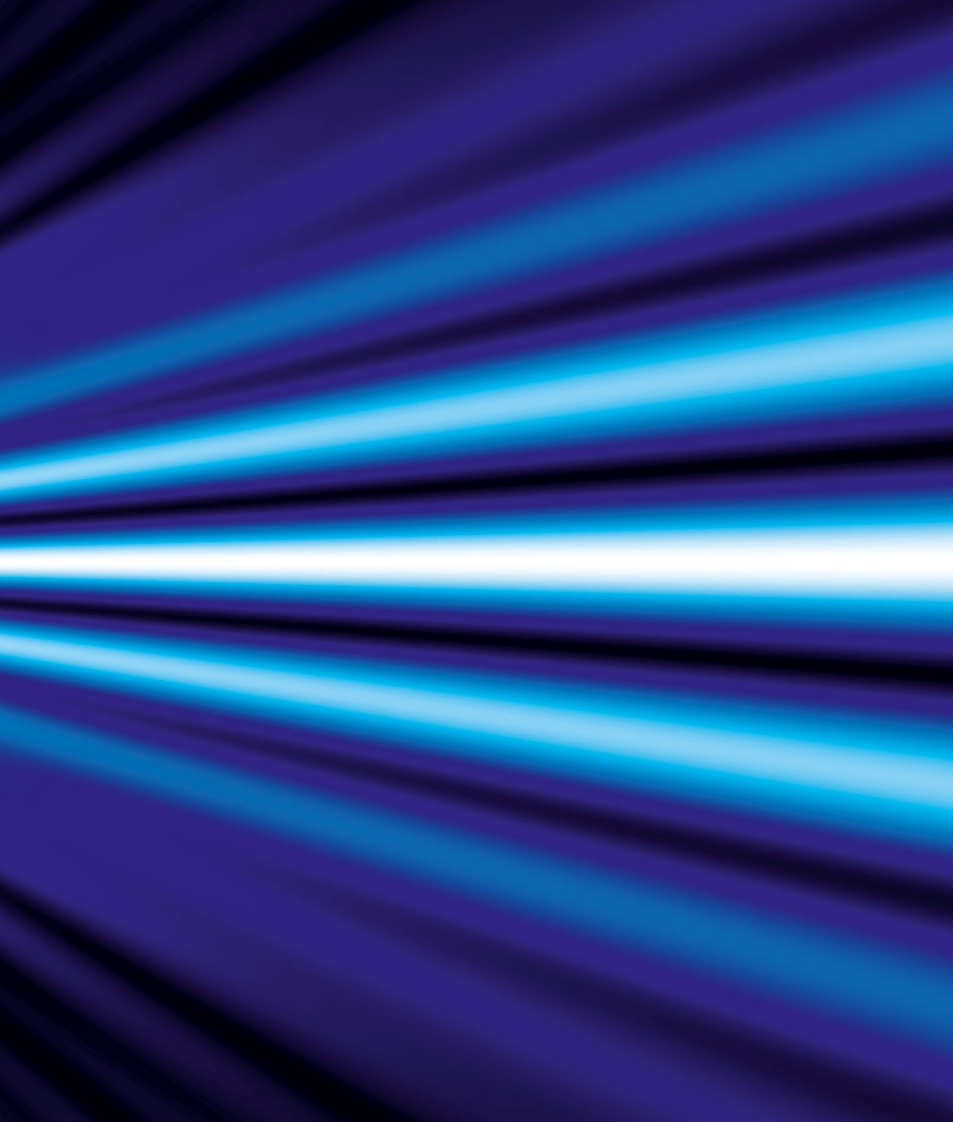


TIMM WETKAMP (COMMONS WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:DOUBLE_SLIT_XRAY_SIMULATION_MONOCHROMATIC_BLUE_WHITE.PNG) / CC BY 3.0 DE (CREATIVE COMMONS ORG/LICENSING/3.0/DE/LEGALCODE)

Diese Simulation zeigt, wie sich hinter einem Doppelspalt (linker Bildrand) die Wahrscheinlichkeit, ein Quantenobjekt aufzuspüren, überlagert und ausbreitet.

tionelle Schwierigkeiten in der Quantenmechanik verursacht. Vorher lässt sich nicht mit Sicherheit sagen, wo das Photon landen wird – es kann an jedem der Orte erscheinen, an denen die Wahrscheinlichkeit dafür ungleich null ist. Es gibt außerdem keine Möglichkeit, die Bahn des Photons von der Quelle bis zum Detektor nachzuzeichnen.

Nach der Interpretation von Werner Heisenberg, einem der Pioniere der Quantenmechanik, sind Dinge erst dann real, wenn sie beobachtet werden. Er hielt es für nicht mehr möglich, »zur Vorstellung einer objektiven, realen Welt zurückzukehren, deren kleinste Teile



TIMM WETKAMP (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:DOUBLE_SLIT_XRAY_SIMULATION_MONOCHROMATIC_BLUE_WHITE.PNG) / CC BY 3.0 DE (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/BY/3.0/DE/LEGALCODE)

in der gleichen Weise objektiv existieren wie Steine oder Bäume, gleichgültig, ob wir sie beobachten oder nicht«. Der US-Physiker John Wheeler benutzte eine Variante des Doppelspaltexperiments für sein Argument, letzten Endes sei »ein elementares Quantenphänomen so lange nicht wirklich, solange es nicht registriert ist«.

In der Quantentheorie ist jedoch völlig unklar, was eine Messung eigentlich sein soll. Sie postuliert einfach, das dafür verwendete Gerät müsse aus der klassischen Welt stammen, ohne eine Grenze zwischen dieser und dem Quantenreich zu definieren. Einige Physiker gestehen sogar dem menschlichen Bewusstsein eine Rolle beim Kollaps zu. Allerdings liefern die modernen Varianten des Doppelspaltexperiments keinen empirischen Beweis für solche Behauptungen.

Der Versuch lässt sich zudem anders interpretieren. So vereint die De-Broglie-Bohm-Theorie den Wellen- und Teilchencharakter der Realität: Ein Photon bewegt sich hier mit einer jederzeit eindeutigen Position auf den Doppelspalt zu und durchläuft den einen oder anderen Spalt – jedes Photon hat also eine Bahn. Es reitet auf einer führenden Welle, die durch beide Schlitze geht und das Lichtteilchen zu einem Ort der konstruktiven Interferenz leitet.

Modelle im Labortest

1979 simulierten Chris Dewdney, Chris Philippides und Basil Hiley vom Birkbeck College in London erstmals die Voraussagen dieser Theorie für Bahnen von Teilchen, die sich durch den Doppelspalt bewegen. Im Lauf des letzten Jahrzehnts ließen sich solche Trajektorien experimentell nachweisen, wenn

auch mit einer umstrittenen Technik, den so genannten schwachen Messungen.

Ebenso bleiben Theorien im Rennen, die mit dem zufälligen Kollaps von Wellenfunktionen argumentieren: Je mehr Teilchen im Quantensystem stecken, desto wahrscheinlicher ist der Vorgang. Beobachter entdecken lediglich das Ergebnis. Forscher um Markus Arndt an der Universität Wien haben das beispielsweise überprüft, indem sie immer größere Moleküle durch einen Doppelspalt geschickt haben. Laut solchen Kollapsmodellen sollten Materieteilchen jenseits einer gewissen Massenschwelle nicht in einer Quantenüberlagerung bleiben. Das würde das Interferenzmuster zerstören. Arndts Team hat selbst bei einem Molekül mit mehr als 800 Atomen Interferenz beobachtet; die Suche nach der Grenze geht weiter (siehe »An der Grenze zur Quantenwelt«, **Spektrum** August 2018, S. 12).

Der englische Theoretiker Roger Penrose hat eine Version eines Kollapsmodells entwickelt, bei der Gravitationsinstabilitäten ein Objekt aus einer Überlagerung in den einen oder anderen Zustand bringen – umso schneller, je massereicher es ist. Das geschieht unabhängig von bewussten Beobachtern. Dirk Bouwmeester von der University of California arbeitet daran, die Idee mit einer angepassten Variante des Doppelspaltexperiments zu überprüfen. Hier geht es im Grundgedanken nicht nur um eine Überlagerung des Wegs eines Photons durch zwei Spalte auf einmal, sondern auch darum, einen der Spalte selbst in eine Überlagerung zweier möglicher Orte zu bringen. Laut Penrose bleibt dieser Spalt entweder in Überlagerung oder kollabiert, noch während das Photon durch die Apparatur rast, was zu verschiedenen Arten von Interferenzmustern führt. Bouwmeester arbeitet bereits seit einem Jahrzehnt an dem Versuchsaufbau.

des letzten Jahrzehnts an Popularität gewonnen, etwa durch Verfechter wie den einflussreichen Informatiker Judea Pearl. Kausale Modelle stellen Ursache-Wirkungs-Verbindungen zwischen den Elementen eines Experiments her. Bei der Untersuchung zweier korrelierter Ereignisse A und B lässt sich mitunter nicht feststellen, ob A Ursache von B ist oder umgekehrt. Möglicherweise verursacht sogar ein bislang unverdächtigtes Ereignis C sowohl A als auch B. In solchen Fällen können kausale Modelle dabei helfen, C aufzuspüren.

Chaves und seine Kollegen konzentrierten sich auf das Wheeler-Experiment mit verzögerter Entscheidung. Sie waren sich sicher: Sie würden keinen Prozess finden, der auf verborgene Weise einem Photon intrinsische Eigenschaften zuordnet und sein Verhalten erklärt, ohne auf Retrokausalität zurückgreifen. Sie rechneten vielmehr fest damit, dass das Experiment mit verzögerter Entscheidung »in dem Sinne superkontraintuitiv ist, dass es sich durch kein kausales Modell erklären lässt«, so Chaves.

Wie viel Quantenmechanik braucht eine Beschreibung?

Doch das Ergebnis ihrer theoretischen Untersuchungen überraschte sie, und der Weg dorthin erwies sich sogar als relativ einfach. Zunächst ordneten die Forscher dem Photon unmittelbar nach der Durchquerung des ersten Strahlteilers einen inneren Zustand zu, der durch eine »verborgene Variable« beschrieben wird. In diesem Zusammenhang bedeutet verborgen, dass die Größe in der Standardquantenmechanik nicht vorkommt, aber das Verhalten des Photons auf irgendeine Weise beeinflusst. Die Experimentatoren entschieden dann, ob sie einen zweiten Strahlteiler einfügten oder nicht. Im kausalen Modell, das Reisen zurück in der Zeit verbietet, kann die Wahl der Experimentatoren den vorherigen Zustand des Photons nicht beeinflussen.



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/quantenphysik](https://www.spektrum.de/t/quantenphysik)

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

Mit Hilfe der verborgenen Variablen konnte das Team anschließend Regeln aufstellen, mit denen sich aus dem Wert der Variablen und der An- oder Abwesenheit des zweiten Strahlteilers ergibt, ob das Photon auf D1 oder auf D2 trifft – und zwar in vollständiger Übereinstimmung mit den Vorhersagen der Quantenmechanik. Damit hatten die Forscher unerwartet eine klassische, kausale und realistische Erklärung in ihren Händen. Sie hatten ein Schlupfloch in Wheelers Experiment gefunden.

Das kam unerwartet für manche Physiker, erinnert sich der theoretische Quantenphysiker Tim Byrnes von der New York University in Schanghai: »Den Leuten war bis

dahin einfach nicht klar, dass diese Art von Experiment in Einklang mit einer klassischen Erklärung gebracht werden kann. Man kann eine Theorie mit verborgenen Variablen konstruieren, die ohne Quantenmechanik auskommt.«

Von diesem Punkt aus war der nächste Schritt für Chaves, Physikern mit Hilfe eines veränderten Experimentaufbaus eine Unterscheidung zu ermöglichen – zwischen der klassischen Theorie mit verborgenen Variablen und der Quantenmechanik. Im modifizierten Gedankenexperiment wird das Mach-Zehnder-Interferometer mitsamt zweitem Strahlteiler um zwei »Phasenschieber« ergänzt – einen am Anfang des Experiments, einen am Ende. Sie können als Auswahlschalter von den Experimentatoren willkürlich betätigt werden.

Netto wirken sich die zwei Phasenschieber auf die relativen Weglängen des betrachteten Photons aus. Dadurch ändert sich das Interferenzmuster und somit auch das angenommene wellenartige oder teilchenartige Verhalten des Untersuchungsobjekts. Man kann beispielsweise die Einstellung des ersten Phasenschiebers so wählen, dass das Photon innerhalb des Interferometers als Teilchen agiert – das Photon durch den zweiten Phasenschieber aber dazu zwingen, als Welle aufzutreten. Dabei darf der zweite Phasenschieber erst nach dem ersten betätigt werden.

Mit ihrem neuen Versuchsaufbau fanden die Forscher eine Möglichkeit, zwischen einem klassischen kausalen Modell und der Quantenmechanik zu unterscheiden. Angenommen, der erste Phasenschieber kann eine von drei Stellungen annehmen, der zweite eine von zwei. Das ergibt insgesamt sechs verschiedene Kombinationen für das Experiment. Die Forscher rechneten aus, was sie für jede davon erwarten würden. Dabei unterschieden sich die Vorhersagen des klassischen Modells mit verborgenen Variablen von den Vorhersagen der Quantenmechanik. Daraufhin konstruierte das Team eine Formel, die von den Wahrscheinlichkeiten für das Eintreffen des Photons in einem bestimmten Detektor abhängt, je nach Einstellung der Phasenschieber. Liefert die Formel das Ergebnis null, kann das klassische kausale Modell die statistischen Befunde erklären. Liefert sie dagegen einen Wert größer als null, dann gibt es (unter Berücksichtigung bestimmter Bedingungen für die verborgene Variable) keine klassische Erklärung.

Gemeinsam mit Forschern um den Quantenphysiker Fabio Sciarrino von der Universität La Sapienza in Rom machte sich Chaves daran, die Ungleichung experimentell zu überprüfen. Zur gleichen Zeit führten auch zwei Gruppen in China den Versuch durch: die eine geleitet von Jian-Wei Pan, einem Experimentalphysiker an der chinesischen Universität der Wissenschaften und Technik, die andere von Guang-Can Guo an der gleichen Hochschule.

Jedes Team führte das Experiment ein wenig anders durch. Guos Gruppe verwendete als Grundlage ein echtes Mach-Zehnder-Interferometer. »Das kommt meiner Ansicht nach dem ursprünglichen Vorschlag Wheelers am nächsten«, kommentiert der an den Versuchen unbeteiligte theoretische Physiker Howard Wiseman von der Griffith University in Australien.

Die Forscher konnten klassische kausale Modelle ausschließen – unter bestimmten Voraussetzungen

Die Formel spuckte für alle drei Experimente einen Wert größer als null aus – mit unwiderlegbarer statistischer Signifikanz. Damit konnten die Forscher klassische kausale Modelle ausschließen, die Wheelers Experiment mit verzögerter Entscheidung erklären würden. Das Schlupfloch war geschlossen. »Wir haben Wheelers berühmtes Gedankenexperiment gerettet«, meint Pan. Kaiser zeigt sich beeindruckt von Chaves' »eleganter« theoretischer Arbeit und den nachfolgenden Experimenten: »Indem jedes der jüngsten Experimente eine klare Verletzung gefunden hat, liegen überzeugende Beweise dafür vor, dass klassische Modelle tatsächlich nicht die Welt beschreiben, während quantenmechanische Vorhersagen wunderbar zu den neuen Ergebnissen passen.«

Allerdings gehen in die Formel bestimmte Voraussetzungen ein. Die wichtigste davon: Die im kausalen Modell vorhandene klassische verborgene Variable kann einen von zwei Werten haben. Chaves hält das für vernünftig, da das betrachtete Quantensystem, also das Photon, ebenfalls nur ein Bit an Information codieren kann – es durchläuft entweder den einen oder den anderen Arm des Interferometers. »Es ist also eine natürliche Annahme, dass auch das Modell mit verborgener Variable zweidimensional ist«, argumentiert Chaves.

Es bleibt offen, welche Interpretation die Ergebnisse richtig einordnet

Wenn man hingegen von einer verborgenen Variable mit größerer Informationskapazität ausgeht, könnte das klassische kausale Modell die in den Versuchen beobachtete Statistik durchaus erklären. Zudem ermöglicht das Experiment keine Entscheidung für oder gegen das populärste unter den Modellen mit verborgenen Variablen: die De-Broglie-Bohm-Theorie. Dabei handelt es sich um eine deterministische Alternative zur Standardquantenmechanik. Bei dem Konzept besitzen die Teilchen stets definierte Positionen (das sind die verborgenen Variablen) und damit eine objektive Realität, aber sie werden von einer »Führungswelle« geleitet. Diese durchläuft beide Wege, das Teilchen aber nur einen davon. Die An- oder Abwesenheit des zweiten Strahlteilers beeinflusst die Welle, die das Teilchen zum Detektor führt – mit exakt denselben Ergebnissen wie in der Standard-Quantenmechanik. Die De-Broglie-Bohm-Theorie erklärt darum auch problemlos die Ergebnisse des Experiments mit verzögerter Entscheidung.

Für Wiseman ist deshalb längst nicht klar, welche Interpretation die Ergebnisse des Experiments richtig einordnet (für eine weitere Idee siehe »Das Universum als zellulärer Automat, S. 20). »In der Kopenhagener Deutung

gibt es keine eigentümliche Umkehrung der Zeit, weil wir kein Recht haben, irgendeine Aussage über die Vergangenheit des Photons zu treffen«, fasst er die Situation zusammen. »In der De-Broglie-Bohm-Theorie existiert eine Realität, die von unserem Wissen unabhängig ist, aber es gibt keine Zeitumkehr und damit kein Problem – die Beschreibung des ganzen Ablaufs ist eindeutig kausal.«

Auch wenn er die Anstrengungen lobt, will Kaiser die Dinge noch weiter auf die Spitze treiben. In den bisher durchgeführten Experimenten entscheidet zwar stets der Zufall darüber, wie der zweite Phasenschieber eingestellt oder ob ein zweiter Strahlteiler eingefügt wird. Doch die verwendeten Zufallsgeneratoren basieren ihrerseits auf quantenmechanischen Laboraufbauten. Und da die Experimente die Quantenmechanik selbst überprüfen sollen, sieht das Kaiser zufolge ein wenig nach einem Zirkelschluss aus: »Es wäre hilfreich zu überprüfen, ob die experimentellen Ergebnisse unverändert bleiben, wenn wir vollständig andere Quellen für die Zufälligkeit verwenden.«

Deshalb hat Kaiser mit seinen Kollegen einen Zufallsgenerator gebaut, der Photonen mehrerer Milliarden Lichtjahre entfernter Quasare verwendet. Ein Teleskop am Table Mountain Observatory in Kalifornien empfängt die Photonen. Hat ein Photon eine Wellenlänge kleiner als ein bestimmter Grenzwert, liefert der darauf basierende Zufallsgenerator eine Null, sonst eine Eins. Mit diesem Bit lässt sich die Entscheidung für das Experiment treffen. Sollten die Ergebnisse dann immer noch Wheelers ursprüngliche Überlegungen unterstützen, dann wäre das »ein weiterer Grund dafür, anzunehmen, dass die Welle-Teilchen-Dualität sich nicht durch Ideen aus der klassischen Physik beseitigen lässt«, meint Kaiser. »Der Spielraum für alternative Konzepte zur Quantenmechanik wird immer weiter eingeschränkt. Das streben wir jedenfalls an.« Der Körper des Drachen, der sich für kurze Zeit vor den Augen der Forscher abzeichnen schien, ist vorerst wieder im Rauch verschwunden. ◀

QUELLEN

Chaves, R. et al.: Causal Modeling the Delayed-Choice Experiment. In: Physical Review Letters 120, 190401, 2018

Huang, H.-L. et al.: A Loophole-Free Wheeler-Delayed-Choice Experiment. arXiv:1806.00156, 2018

Polino, E. et al.: Device Independent Certification of a Quantum Delayed Choice Experiment. arXiv:1806.00211, 2018

Yu, S. et al.: Experimental Realization of Causality-Assisted Wheeler's Delayed-Choice Experiment Using Single Photons. arXiv:1806.03689, 2018

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Closed Loophole Confirms the Unreality of the Quantum World« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

INTERVIEW

DAS UNIVERSUM ALS ZELLULÄRER AUTOMAT

Die theoretische Beschreibung der Quantenmechanik weist bis heute Lücken auf. Der niederländische Physiker Gerardus 't Hooft versucht sie zu schließen. Im Gespräch mit dem Nobelpreisträger von 1999 versuchen wir, seine Vorstellung von der Wirklichkeit zu ergründen.

» spektrum.de/artikel/1603742

Herr Professor 't Hooft, im August 1980 haben Sie in Spektrum einen Artikel über das Standardmodell der Teilchenphysik publiziert, in dem Sie die Welt subatomarer Teilchen nach damaligen Wissensstand erklären. Wie hat sich dieses theoretische Konzept seither verändert?

Damals war es das einfachste mathematische Modell, das mit den experimentellen Daten übereinstimmte. Wir hätten nie gedacht, dass sich diese Theorie über so viele Jahrzehnte behaupten würde. Im Gegenteil: Wir hatten erwartet, dass mit fortschreitender Zeit einige Veränderungen nötig seien.

Natürlich haben wir durch Experimente in der Zwischenzeit großartige Entdeckungen gemacht, etwa als die Wissenschaftler am CERN 2012 das Higgs-Teilchen fan-

den. Doch das theoretische Konzept hat sich über die knapp vier Jahrzehnte kaum verändert. Einige Forscher haben neue Arten von Teilchen erwartet, die auf eine übergeordnete Theorie deuten würden, doch diese blieben bislang aus.

Das ist doch eine gute Nachricht, wenn das Standardmodell so gut passt.

Ja und nein. Denn selbst wenn es subatomare Partikel derzeit sehr gut beschreibt, birgt es einige Rätsel. Wir verstehen beispielsweise die fundamentalen Naturkonstanten nicht. Warum wiegt das Elektron so viel, wie es wiegt, und nicht mehr oder weniger?

Die meisten Naturkonstanten können wir zwar sehr genau messen, aber wir wissen nicht, woher sie kommen. Jeder Versuch, die exakten Werte zu erklären, ist bisher gescheitert – bis auf das so genannte anthropische Prinzip: Es besagt, dass die Naturkonstanten diese Werte haben, weil wir sonst nicht existieren könnten. Allerdings sind die meisten Wissenschaftler mit dieser Argumentation unzufrieden.

Keine Theorie, die alle vier Grundkräfte vereinen soll, lässt sich derzeit experimentell überprüfen. Darum fordern viele Physiker, dass eine solche Theorie mathematisch gesehen einfach und elegant – »natürlich« – sein soll. Darin haben willkürlich anmutende Naturkonstanten keinen Platz. Den Begriff der Natürlichkeit prägen Sie bereits vor 40 Jahren. Sind Sie noch immer der Meinung, dass das der richtige Weg zu einer Weltformel ist, oder brauchen wir radikal neue Konzepte? Diese Idee steht momentan stark unter Beschuss. Die »natürliche« Stringtheorie hat nämlich etliche Teilchen vorausgesagt, doch die Physiker am CERN konnten bisher kein einziges davon bestätigen. Ich weiß nicht, ob die

SERIE
**Große Forscher
im Gespräch**

40 Jahre **Spektrum**
der Wissenschaft

Teil 1: November 2018
Elizabeth Blackburn

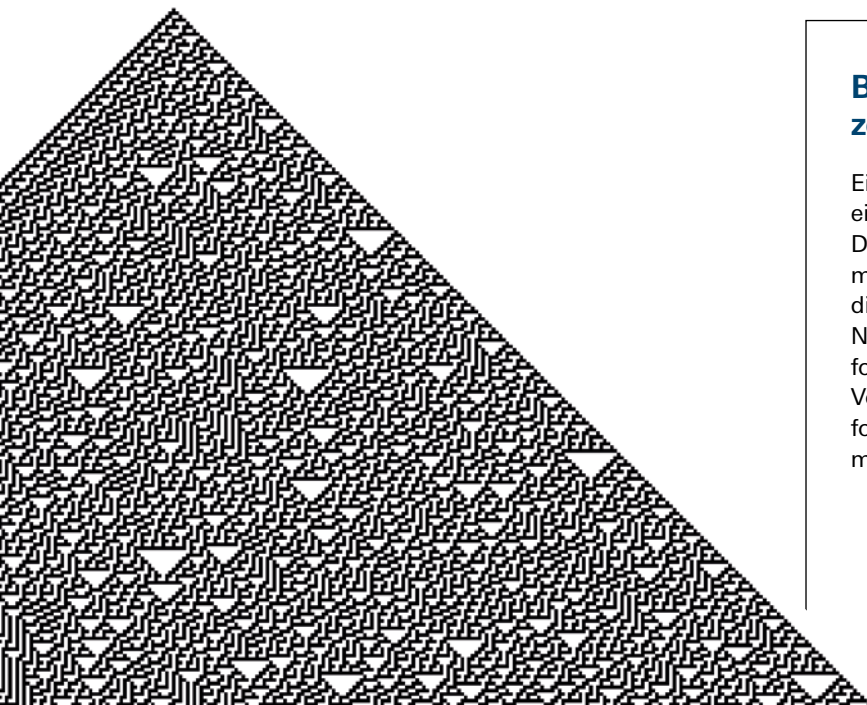
Teil 2: Dezember 2018
Gerardus 't Hooft

Teil 3: Januar 2019
Ulf Riebesell

Teil 4: Februar 2019
Frank Anthony Wilczek

Teil 5: März 2019
Martin Edward Hellman

Teil 6: April 2019
Erwin Neher und Bert Sakmann



ANDREAS HALLER, UNIVERSITÄT MAINZ

250 Iterationen eines eindimensionalen zellulären Automaten, in dem die Nullen weiß und die Einsen schwarz gefärbt sind.

Natürlichkeit noch gerettet werden kann. Womöglich brauchen wir vollkommen neue Definitionen.

In Ihrem Spektrum-Artikel von 1980 haben Sie geschrieben, dass man »in den letzten Jahren (...) dem Ziel, eine übergreifende Theorie für alle vier Grundkräfte zu formulieren, näher gekommen« sei. Physiker suchen auch heute noch nach einer solchen Weltformel. Sind wir ihr nach 38 Jahren nun wirklich näher?

Das denke ich schon, allerdings haben wir noch einen weiten Weg vor uns. Dieser Bereich entwickelt sich sehr langsam. Dennoch haben sich die grundlegenden Ideen über die Jahre verändert: In der Stringtheorie nehmen die Forscher an, dass die Grundbausteine der Materie nicht punkt-, sondern linienförmig sind. Doch wie gesagt, bisher ließ sich nichts davon bestätigen.

Glauben Sie noch an die Stringtheorie?

Viele Stringtheoretiker hatten gemeint, die Lösung fast gefunden zu haben. Ich habe immer gesagt, dass sie zu optimistisch sind. Das sollten sie nun endlich zugeben. Ehrlich gesagt denke ich, dass die Stringtheorie einer Beschreibung unseres Universums nicht einmal nahe ist.

Welcher Ansatz erscheint Ihnen vielversprechender?

Momentan arbeite ich an möglichen Quanteneffekten, die in Schwarzen Löchern stattfinden können. So habe ich schon vor einigen Jahren bisher unbekannte Eigenschaften von Raum und Zeit enthüllt, etwa dass die Menge an Information im Raum begrenzt ist und mit der Oberfläche

Beispiel für einen einfachen zellulären Automaten

Einer der einfachsten zellulären Automaten ist eindimensional und enthält nur Nullen und Einsen. Der Anfangszustand, also die erste Zeile des Automaten, besteht in diesem Beispiel aus 15 Zellen, die alle null sind, bis auf eine Eins in der Mitte. Nach jedem Zeitschritt baut sich unter der Zahlenfolge eine weitere auf, wobei der Automat die Vorschrift befolgt: Tritt über der neuen Zahlenreihe folgende Dreierkombination auf, ersetzt er die mittlere Zahl durch eine neue:

000	111	110	101	100	011	010	001
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
0	0	0	0	1	1	1	1

Der zelluläre Automat liefert dann:

```

0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0
0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0
0 0 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0
0 1 1 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0
  
```

anwächst – und nicht wie erwartet mit dem Volumen. Es gibt weitere unglaubliche und ungeklärte Phänomene, beispielsweise dass Schwarze Löcher Informationen zu vernichten scheinen. Ich gehe davon aus, dass wir noch viel von ihrer Erforschung lernen werden.

Neben Ihren kosmologischen Forschungsergebnissen haben Sie vor zwei Jahren ein Buch veröffentlicht, in dem Sie die Quantenmechanik aus einer neuen Perspektive darstellen. Warum sind Sie mit den bereits existierenden Interpretationen unzufrieden?

Mich stört, dass die ursprüngliche Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik, die auf Bohr und Heisenberg zurückgeht, nicht erklärt, was im Kleinsten wirklich geschieht. Bei Experimenten messen wir etwas und erhalten ein Ergebnis, doch wir wissen nicht, wie es dazu kam. Wir strahlen beispielsweise ein Elektron auf einen Doppelspalt und können messen, durch welchen Spalt es gegangen ist, ohne zu wissen warum. Ein anderes Elektron könnte im nächsten Versuch den anderen Spalt durchqueren. Was ist mit dem Teilchen geschehen, so dass wir genau dieses Ergebnis messen?

Das Problem ist, dass wir den exakten Ausgang eines einzelnen Experiments nicht vorhersagen können – die

Quantenmechanik erlaubt uns lediglich, die Wahrscheinlichkeiten für alle möglichen Ergebnisse zu berechnen. Wenn wir ein und denselben Versuch 100-mal wiederholen, können wir abschätzen, wie oft dieses oder jenes Ereignis eintritt. Anders gesagt: Durch statistische Methoden treffen wir korrekte Vorhersagen. Doch das allein genügt mir nicht; ich möchte erfahren, was wirklich vor sich geht.

Es gibt neben der Kopenhagener Deutung ja auch noch andere Interpretationen der Quantenmechanik. Was halten Sie von ihnen?

In der Tat gibt es etliche Deutungen. Viele Physiker stört nämlich das fehlende Verständnis von Wirklichkeit. Die zwei bekanntesten Interpretationen, welche die Realität berücksichtigen, sind die bohmsche Mechanik und die Viele-Welten-Theorie. In beiden nehmen die Forscher an, dass alle möglichen Ausgänge eines Experiments tatsächlich eintreten – und zwar in parallelen Universen. Das halte ich jedoch für ein sehr fragwürdiges Konzept. Ich denke, dass die Wissenschaft die wahren Antworten noch nicht kennt; wir sind bisher einfach zu dumm.

In Ihrem Buch beschreiben Sie die Quantenmechanik durch zelluläre Automaten. Was hat es damit auf sich?

Ein zellulärer Automat ist ein einfaches Computermodell eines zeitlich veränderlichen Systems. Der Automat setzt sich aus zwei-, drei- oder mehrdimensionalen Zellen zusammen, die ein Gitter bilden. In den Zellen sind die zeitlich veränderlichen Eigenschaften der Theorie eingetragen, die »Freiheitsgrade«, wie der Ort oder die Geschwindigkeit eines Teilchens. Um die Naturgesetze nachzuahmen, gebe ich vor, dass eine Zelle zu jedem Zeitpunkt nur ihre Nachbarzellen beeinflusst. Mit fortschreitender Zeit wird das System immer komplizierter, und irgendwann können schließlich alle Zellen miteinander wechselwirken.

Wie kamen Sie auf die Idee, die Quantenmechanik so zu beschreiben?

Der Knackpunkt der Quantenmechanik ist, dass sie nicht kontinuierlich ist. Die dynamischen Variablen – beispielsweise die Energie eines Teilchens – ändern sich stufenweise, sie sind »gequantelt«. Und genau diese Eigenschaft zeichnet ebenso die Einträge zellulärer Automaten aus, hier also die Freiheitsgrade.

Welche Vorteile bietet Ihre Beschreibung gegenüber anderen Formulierungen?

Sie ist extrem effizient. In der Viele-Welten-Interpretation und der bohmschen Mechanik nehmen Forscher an, dass es fast unendlich viele verschiedene Universen gibt. Das Modell eines zellulären Automaten umfasst dagegen bloß ein Universum und ist dadurch wesentlich ergiebiger.

Glauben Sie, dass unser Universum ein zellulärer Automat ist?

Dem Prinzip nach ja. Denn beide Systeme teilen ähnliche Eigenschaften: Anfangs sind sie sehr einfach – das Universum ist äußerst klein und relativ homogen, und der zellu-



**Gerardus 't Hooft
(* 5.7. 1946)**

Der niederländische Teilchenphysiker studierte an der Universität Utrecht, wo er 1972 promovierte. Für die während dieser Arbeit entwickelte Renormierung von Yang-Mills-Feldern erhielt er zusammen mit seinem Doktorvater Martinus Veltman 1999 den Physik-Nobelpreis.

läre Automat hat einen unkomplizierten Ausgangszustand. Dann dehnen sie sich immer weiter aus und werden komplexer.

Ich denke aber, dass meine Theorie vermutlich nur ein grob vereinfachtes Modell der Wirklichkeit darstellt. Die Zellen des Automaten könnten in viel komplizierteren Strukturen angeordnet sein als in den einfachen Gittern, die ich mir vorstelle.

Aus wie vielen Zellen bestünde ein Automat, der das gesamte Universum simuliert?

Im Prinzip bräuchten wir zu jedem Freiheitsgrad im Universum eine Zelle. Ein Freiheitsgrad entspricht einem Bit an Information. Nun besitzen alle existierenden Teilchen mehrere Freiheitsgrade, hinzu kommen noch die Eigenschaften von Raum und Zeit.

Wie bereits erwähnt, haben wir herausgefunden, dass das Maß an Information im Universum begrenzt ist. Ein Quadratmeter Raum enthält unseren Berechnungen zufolge maximal 10^{69} Bit. Diese Zahl ist endlich, wenn auch unvorstellbar groß, sie übersteigt die Anzahl der Atome in der Milchstraße um ein Zehnfaches. Wir brauchen statistische Methoden, um mit einer solchen Menge an Information umzugehen. Und als genau das sehe ich die Quantenmechanik: ein Modell, das eine riesige Zahl an Freiheitsgraden statistisch verarbeitet.

Ein zellulärer Automat ist ein klassisches Objekt und folgt damit nicht den Gesetzen der Quantenwelt. In den 1960er Jahren hat der Physiker John Bell allerdings bewiesen, dass es keine klassische Beschreibung der

Quantenmechanik geben kann. Was bedeutet das für Ihre Arbeit?

Viele Wissenschaftler führen diese so genannten No-go-Theoreme als ernste Herausforderung meines Modells an. Aus den Theoremen folgt, dass die Quantenmechanik nicht durch eine klassische Theorie beschrieben werden kann, die lokal ist. Damit ist gemeint, dass sich Information weder rückwärts in der Zeit noch schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten darf.

Die Theoreme setzen allerdings voraus, dass ein Beobachter einen freien Willen hat: Er muss beispielsweise frei entscheiden können, ob er den Impuls oder den Ort eines Teilchens messen will. Wenn das Universum aber ein zellulärer Automat ist, dann ist der Experimentator selbst auch ein Teil davon. Die Wahl seiner Messung ist durch den Automaten also schon festgelegt – aus diesem Grund lassen sich die No-go-Theoreme gar nicht auf mein Modell anwenden.

Sie glauben also nicht an einen freien Willen?

Ich glaube, dass alle Naturgesetze vollkommen deterministisch sind. Nichts geschieht ohne Grund. Allerdings spielen dabei so viele Variablen eine Rolle, dass niemand sie jemals alle verstehen, geschweige denn kontrollieren kann. Darum gibt es in der Praxis überall so etwas wie einen freien Willen.

Trotz Ihrer Erklärung behaupten dennoch einige Wissenschaftler, dass Ihr Modell nicht lokal ist und damit den bellschen No-go-Theoremen nicht entgeht. Woran liegt das?

Der zelluläre Automat führt zu unglaublich starken Verbindungen zwischen den einzelnen Zellen. Wir verstehen noch nicht richtig, wie sich diese Korrelationen zeitlich entwickeln. Sie führen aber zu interessanten Phänomenen, die uns dazu bringen, Lokalität neu zu definieren. Viele Wissenschaftler zitieren die Definitionen von Bell – mit denen ich nicht ganz einverstanden bin – und behaupten deshalb, in meinem Modell müsste sich Information in der Zeit zurückbewegen. Doch das scheint nur so, wenn man die starken Wechselwirkungen zwischen den Zellen nicht versteht. Wir müssen endlich versuchen zu begreifen, wie sich Information zeitlich entwickelt und ausbreitet.

Folgen Sie Blogs oder Foren im Internet und holen so die Meinung anderer Wissenschaftler ein?

Ich habe mit einigen Philosophen über Determinismus und Willensfreiheit diskutiert, das war allerdings nicht immer einfach. Ansonsten beobachte ich, ob andere Forscher meinen Aussagen widersprechen. Dann möchte ich mich verteidigen und herausfinden, warum die Person nicht überzeugt ist. Manchmal hat jemand gute Gründe, die ich gerne verstehen möchte. Doch einige Leute haben sich völlig darauf versteift, dass sich die Quantenmechanik fundamental von einer klassischen Theorie unterscheiden muss. Deren Blogs helfen mir nicht wirklich weiter. Ich höre dann ab einem bestimmten Punkt auf, mich weiter damit zu beschäftigen.

Sie haben eine neue Interpretation der Quantenmechanik entwickelt. Die zu Grunde liegenden Formeln und Gesetzmäßigkeiten bleiben dabei unverändert. Hoffen Sie dennoch, durch Ihre Deutung auf eine neue Physik zu stoßen?

Wenn wir die Quantenmechanik besser verstehen, könnten wir genauere Modelle der Natur entwickeln. Eines meiner Ziele ist es ja, subatomare Teilchen besser zu verstehen.

Wie nah sind Sie diesem Ziel? Können Sie schon das Standardmodell der Teilchenphysik beschreiben?

Nein, wir sind noch recht weit davon entfernt. Ehrlich gesagt hoffe ich, dass eines Tages ein brillanter junger Mensch mit fabelhaften neuen Ideen auftaucht und uns weiterbringt. Eventuell müssen wir erst die Gravitation besser verstehen, um unsere Probleme zu lösen.

Die Theorie subatomarer Teilchen mit der Gravitation zu verbinden, zählt zu den schwierigsten Aufgaben der Physik. Wäre es nicht sinnvoller, mit einem einfacheren Problem zu starten?

Nicht unbedingt. Die Gravitation ist eine fundamentale Eigenschaft der Natur: Alles unterliegt ihr, und nichts kann ihr entkommen; sie krümmt sogar die Raumzeit. Wir haben anfangs versucht, eine Theorie subatomarer Teilchen ohne Gravitation zu entwickeln. Doch das ist extrem kompliziert, wir haben sehr viel Arbeit hineingesteckt und keine nennenswerten Erfolge verbucht. Es scheint so, als ob wir etwas übersehen. Und das tun wir tatsächlich: Wir vernachlässigen die Gravitation. Solange man sie nicht versteht, kann man möglicherweise keinen passenden zellulären Automaten formulieren.

Außerhalb der Physik sind Sie Botschafter des niederländischen Projekts Mars One, das bis 2040 den Roten Planeten besiedeln möchte. Wie begann Ihre Begeisterung für diese Mission?

Sie begann, als ich ein paar junge, enthusiastische Menschen kennen lernte. Sie rannten mit dieser Idee herum, dass es an der Zeit wäre, über bemannte Marskolonien nachzudenken. Ich stimmte mit ihnen überein – auch wenn sie damals in ihrer Zeit- und Finanzplanung viel zu optimistisch waren. Selbst wenn die Siedler nicht auf die Erde zurückkehren, bringt ein solches Projekt erhebliche Kosten mit sich. Heute meine ich, dass wir zuerst über Kolonien auf dem Mond nachdenken sollten. Dennoch möchte ich die Menschen ermutigen, an solchen Ideen zu arbeiten. Auch wenn es noch ein langer Weg dorthin ist, bin ich davon überzeugt, dass wir in ferner Zukunft den Weltraum in großem Stil besiedeln werden. ◀

Das Interview führte **Spektrum**-Volontärin **Manon Bischoff**.

LITERATURTIPP

't Hooft, G.: The Cellular Automaton Interpretation of Quantum Mechanics. Springer International Publishing, 2016

Der Physik-Nobelpreisträger präsentiert seine neue Interpretation der Quantenmechanik.



Tasuku Honjo (links) ist ausgebildeter Facharzt. Er studierte und promovierte in Medizin an der Universität Kyoto, wo er heute noch arbeitet. James P. Allison hat einen Dokortitel in Biowissenschaften an der University of Texas erlangt. Er forscht am MD Anderson Cancer Center in Houston.

NOBELPREIS FÜR PHYSIOLOGIE ODER MEDIZIN ENTFESSELTE IMMUNZELLEN GEGEN KREBS

Gegen Krebserkrankungen halfen lange Zeit nur Bestrahlung, Chemotherapie und Chirurgie. Der Nobelpreis 2018 geht an zwei Krebsforscher, die mitgeholfen haben, eine weitere Waffe gegen Tumoren zu schärfen: das menschliche Immunsystem.

James P. Allison von der University of Texas und Tasuku Honjo von der Universität Kyoto haben Rezeptormoleküle erforscht, die auf der Oberfläche von Immunzellen sitzen und diese in vielen Fällen davon abhalten, Krebszellen anzugreifen. Das hat einer Klasse neuer Wirkstoffe den Weg geebnet, den so genannten Immun-Checkpoint-Inhibitoren.

Die Idee, Krebs vom körpereigenen Abwehrsystem bekämpfen zu lassen, ist jahrzehntealt. Schon im 19. Jahrhundert beobachteten Ärzte, dass Krebspatienten in seltenen Fällen wieder gesundeten, wenn sie eine Infektion mit Krankheitserregern erlitten hatten. Doch alle Versuche, eine Immunreaktion künstlich zu erzeugen – etwa durch gezieltes Infizieren oder durch Impfen –, blieben erfolglos oder deutlich hinter den Erwartungen zurück. Das grundsätzliche Problem schien zu sein, dass die Abwehrzellen den Krebs mit angezogener Handbremse zu bekämpfen schienen, egal wie sehr man sich bemühte, sie zu aktivieren.

Was es mit dieser Bremse auf sich hat, darauf gab es bereits in den 1990er Jahren etliche Hinweise. Nach und nach hatten Arbeitsgruppen damals begonnen zu entschlüsseln, wie es dem Immunsystem gelingt, die Zellen des eigenen Körpers zu erkennen, um sie nicht irrtümlich als Erreger einzustufen und zu attackieren. Basis dieser so genannten Selbsttoleranz sind Signalwege, die man als Immun-Checkpoints bezeichnet. Sie hemmen oder aktivieren Immunzellen namens T-Lymphozyten über Rezeptormoleküle auf deren Oberfläche.

Die Immun-Checkpoints gehören zu einer molekularen Maschinerie, die zur Regulierung der T-Zellen beiträgt. Der »klassische« T-Zell-Rezeptor sitzt auf der Zelloberfläche, wechselwirkt mit einem antigenpräsentierenden Molekül einer anderen Zelle und stellt so deren Identität fest. Die

Checkpoints wiederum signalisieren den T-Lymphozyten, ob die andere Zelle als gefährlich einzuordnen oder aber als Teil des eigenen Körpers anzusehen ist. Verstünde man diese Mechanismen besser, so hofften die Mediziner zunächst, dann wüsste man vielleicht, warum diese Unterscheidung manchmal nicht funktioniert – und könnte neue Therapien gegen Autoimmunerkrankungen entwickeln.

Die Arbeitsgruppe um James P. Allison allerdings wollte das genaue Gegenteil. Krebszellen sind körpereigene Zellen auf Abwegen, und anscheinend aktivieren sie einige bremsende Immun-Checkpoints der T-Lymphozyten, wodurch sie diese von einem Angriff abhalten. Der erste jener hemmenden Checkpoints, der entdeckt wurde, war das Molekül CTLA-4, das auf aktivierten T-Zellen zu finden ist. Allisons Hypothese: Blockiert man CTLA-4, setzt man damit eine Bremse der T-Lymphozyten außer Kraft, woraufhin sie einen Tumor stärker attackieren sollten.

Oft scheitern solche Überlegungen an der komplexen Realität. Nicht aber in diesem Fall: Bereits Allisons erstes Experiment war ein spektakulärer Erfolg. Im Jahr 1994 transplantierte er Tumoren in Mäuse und behandelte die Tiere dann mit Antikörpern gegen CTLA-4 – mit dem Ergebnis, dass die Wucherungen verschwanden. Viele weitere Versuche bestätigten, dass Moleküle gegen hemmende Checkpoints die Immunantwort gegen Krebs erheblich verstärken können. James Allison erhielt für seine bahnbrechenden Arbeiten in der Immunonkologie bereits 2015 den Lasker-DeBakey Clinical Medical Research Award.

CTLA-4 ist aber nicht das einzige solche Molekül. In jahrelangen Forschungen hatte, ebenfalls zu Beginn der 1990er Jahre, eine Arbeitsgruppe um Tasuku Honjo herausgefunden, dass ein Oberflächenrezeptor namens PD-1 die gleiche hemmende Wirkung hat. Daher lag die Überlegung nahe, dieses Molekül auf ähnliche Weise für die

NOBEL- PREISE 2018



© THE NOBEL FOUNDATION. FOTO: LOUISA ENGBLOM / BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Krebstherapie zu nutzen. Eine Besonderheit machte den Rezeptor aus onkologischer Sicht höchst interessant: Das Molekül PD-L1, das PD-1 aktiviert und so T-Lymphozyten hemmt, fand sich nicht nur auf Immunzellen, sondern auch bei einigen Tumorarten. Womöglich nutzten Krebszellen den entsprechenden Signalweg ja bereits, um sich gezielt vor dem Immunsystem zu schützen. Experimente im Jahr 2002 bestätigten den Verdacht: Pflanzten die Forscher bestimmten Krebszellen das Gen für PD-L1 ein, waren die Zellen vor T-Zell-Angriffen geschützt. Der Effekt verschwand, wenn die Wissenschaftler das PD-L1 mit einem Antikörper blockierten.

Die Immunbalance beeinflussen: Ein Spiel mit dem Feuer

Im Jahr 2005 erreichten Honjo und sein Team schließlich den gleichen Erfolg wie zuvor Allison's Gruppe bei CTLA-4: In Experimenten an Mäusen ließ ein Antikörper gegen PD-1 Tumoren schrumpfen. Zudem deutete sich an, dass Immun-Checkpoint-Inhibitoren gegen PD-1 gezielter gegen bestimmte Krebsarten wirken und somit weniger schwere Nebeneffekte hervorrufen als solche gegen CTLA-4. Die japanische Arbeitsgruppe ließ sich das Prinzip im gleichen Jahr patentieren und begann auf dieser Basis, einen Wirkstoff für Menschen zu entwickeln.

Zu dem Zeitpunkt waren monoklonale Antikörper gegen CTLA-4 längst entwickelt und am Menschen getestet – allerdings mit durchwachsenen Resultaten. An dem Wirkstoff Ipilimumab zeigte sich der unschöne Haken des viel versprechenden Prinzips: Die Immun-Checkpoints zu beeinflussen, kann die präzise austarierte Körperabwehr durcheinanderbringen, und das ist nicht nur für Krebszellen gefährlich.

Das Immunsystem bewegt sich auf einem schmalen Grat. Ist es zu wenig aktiv, überwältigen Krebserkrankungen und Infektionen den Körper.

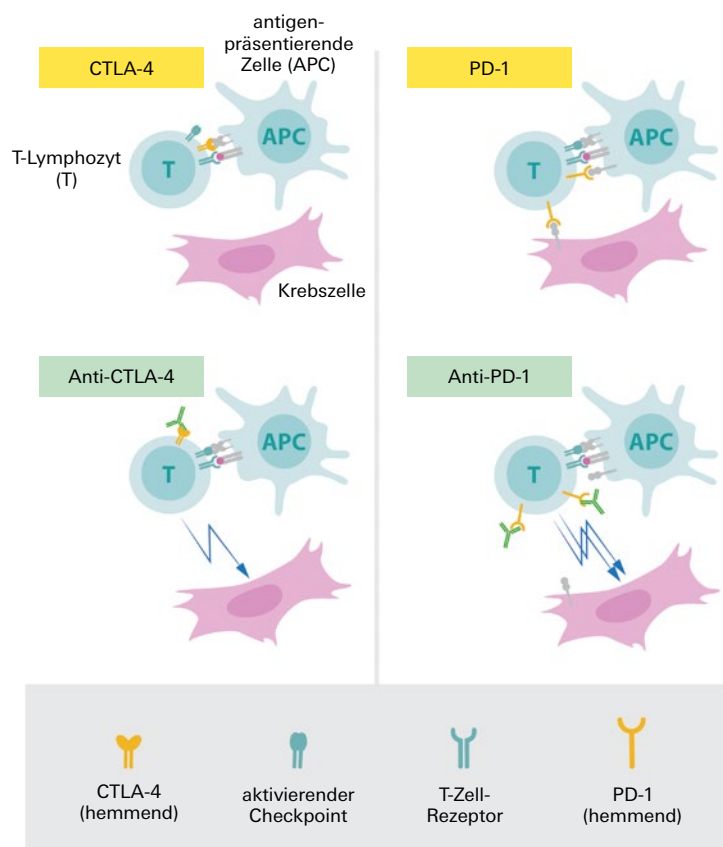
Auf der Oberfläche von T-Lymphozyten sitzen T-Zell-Rezeptoren. Sie binden an Antigene, die von anderen Zellen präsentiert werden, und stellen so deren Identität fest. Weitere Oberflächenmoleküle, so genannte Immun-Checkpoints wie CTLA-4 oder PD-1, signalisieren den T-Lymphozyten, ob die jeweilige Zelle zu attackieren ist oder nicht. Hierzu können sie eine Immunreaktion anregen oder hemmen. Die Checkpoints lassen sich mit Antikörpern blockieren.

Eine überschießende Immunreaktion dagegen zerstört wichtige Gewebe und Organe. Immun-Checkpoint-Inhibitoren zu blockieren, kann dieses System kippen lassen, mit teils dramatischen Folgen. In einer großen klinischen Studie mit Ipilimumab stellten sich bei etwa 15 Prozent der Versuchspersonen schwere Nebenwirkungen ein, ein Patient starb sogar an einer Autoimmunreaktion.

Doch insgesamt sprachen die Ergebnisse für die neue Therapieform: Im Jahr 2011 erhielt der Anti-CTLA-4-Antikörper sowohl von den US-amerikanischen als auch von den europäischen Behörden die Zulassung als Medikament gegen metastasierenden Hautkrebs. Vier Jahre darauf wurden schließlich auch zwei Anti-PD-1-Antikörper für die Krebstherapie zugelassen, und bei einigen Krebserkrankungen wie dem Nierenzellkarzinom setzt man inzwischen eine Kombination aus beiden Checkpoint-Inhibitoren ein.

Es bleiben noch viele Fragen – vor allem dazu, wie man die heftigen Nebenwirkungen in den Griff bekommen kann. Zudem ist nur teilweise verstanden, warum Immun-Checkpoint-Inhibitoren bei manchen Patienten dramatische Behandlungserfolge bewirken, bei anderen aber viel weniger oder gar nicht anschlagen. Offenbar ist das Wirkpotenzial noch lange nicht ausgeschöpft. Doch immerhin zeitigt die lange währende Suche nach einer Immuntherapie gegen Krebs endlich konkrete Erfolge. ◀

Lars Fischer ist Diplomchemiker und Redakteur bei »Spektrum.de«.



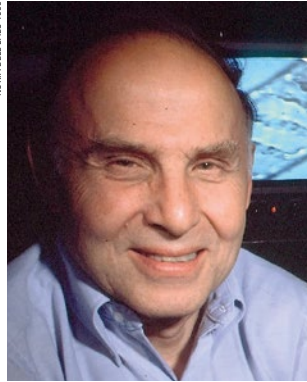
2018 THE NOBEL COMMITTEE FOR PHYSIOLOGY OR MEDICINE / MATTHIAS KARLEN

UNIVERSITY OF WATERLOO



ÉCOLE POLYTECHNIQUE PARIS - J. BARANDE (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/1729471769067448388702547) / CC BY-SA 2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/SYSA2/D/LEGALCODE)

MONIKA BELL LABE 1988



Die Kanadierin Donna Strickland (links) und der Franzose Gérard Mourou haben ein Verfahren zur Verstärkung von Laserpulsen entwickelt. Der US-Amerikaner Arthur Ashkin (rechts) hat eine auf Laserlicht basierende »Pinzette« entwickelt, mit der Forscher winzige Objekte festhalten können.

NOBELPREIS FÜR PHYSIK AUF DEN SPUREN VON »STAR TREK«

Die Gewinner des Physik-Nobelpreises haben die Lasertechnologie entscheidend weiterentwickelt – und ein Stück Sciencefiction Wirklichkeit werden lassen.

Im Fernsehen sieht es so einfach aus: Mal legt die »Enterprise« mit ihren Phasern den Gegner lahm, und mal schleppt sie ihn einfach via Traktorstrahl ab. Der farbige Lichtkegel erfasst das andere Raumschiff mit zauberhafter Leichtigkeit und hält es fest im Griff. Mission erfüllt.

In den 1960er Jahren verfolgte eine ganze Generation von Fernsehzuschauern, was Captain Kirk und seine Crew da taten – und die allermeisten dürften es für eine bestenfalls weit entfernte Zukunftsvision gehalten haben. Arthur Ashkin sah das wohl anders. Jedenfalls machte sich der 1922 geborene Physiker zu dieser Zeit daran, das Prinzip des Traktorstrahls im Labor zu kopieren. Nicht in der Größenordnung der »Enterprise«, sondern im Miniaturmaßstab. Und tatsächlich: In den folgenden Jahrzehnten entwickelte der US-Amerikaner ein Verfahren, mit dem sich mikroskopisch kleine Objekte elegant einfangen und festhalten ließen, und das einzig mit der Kraft des Lichts. Für diese »optische Pinzette« hat der Amerikaner nun eine Hälfte des Physik-Nobelpreises 2018 erhalten.

Die andere teilen sich der Franzose Gérard Mourou von der École Polytechnique in Palaiseau und die Kanadierin Donna Strickland von der University of Waterloo. Mourou und Strickland haben Mitte der 1980er Jahre ebenfalls etwas entwickelt, was einige Jahrzehnte zuvor noch wie Sciencefiction wirkte: eine Technik, mit der sich gebündelte Lichtpulse enorm verstärken lassen.

Das Nobelkomitee würdigt damit die Weiterentwicklungen einer Technologie, die seit 1958 in der Welt ist – des Lasers. Er ist gewissermaßen der Ordnungsliebhaber im Reich des Lichts. Wo eine Schreibtischlampe das ganze Spektrum sichtbarer Strahlung in alle Richtungen aussendet, legt ein Laser klar fest, was für Licht seine Öffnung verlässt. Er feuert Strahlung eines engen Frequenzbereichs in den Raum, die sich wie ein Strich ausbreitet und deren

Wellen stets dem gleichen Schwingungsmuster folgen; Physiker sprechen hier von Kohärenz. Außerdem ist Laserlicht meist viel intensiver als das einer Glühbirne.

Arthur Ashkin ging Ende der 1960er Jahre davon aus, dass derart gebündeltes Licht eine merkliche physische Kraft auf Objekte ausüben kann. Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts hatten Wissenschaftler gezeigt, dass elektromagnetische Strahlung solch einen »Strahlungsdruck« ausüben kann. Bei Radiowellen war dieser aber viel zu schwach, und auch Lampenlicht setzte sichtlich keine Objekte in Bewegung.

Laserlicht kann winzige Plastik Kügelchen anschubsen

Selbst mit der Erfindung des Lasers, der deutlich mehr Licht auf weniger Raum packt, blieben Hürden bestehen: Bei den ersten Laborexperimenten überdeckte die temperaturbedingte Bewegung kleiner Objekte den Strahlungsdruck. Aber Ashkin blieb hartnäckig und tüftelte in den berühmte Bell Telephone Laboratories im US-Bundesstaat New Jersey an einer Lösung.

1969 steckte er durchsichtige Plastikbällchen mit einem Durchmesser von nur wenigen Mikrometern (tausendstel Millimetern) in einen gut isolierten Wassertank und beschoss diese mit einem besonders starken und geschickt fokussierenden Laser. Und siehe da: Die Kügelchen bewegten sich, wie Ashkin unter dem Mikroskop beobachtete.

1971 feuerten der Physiker und ein Kollege dann mit einem 250-Milliwatt-Laser von unten auf eine 20 Mikrometer große, hohle Glaskugel. Das winzige Objekt blieb in der Luft stehen, wo Ashkin es mit zwei parallel ausgerichteten und gegenläufigen Strahlen festhielt. Das kam einem Mini-Traktorstrahl schon ziemlich nahe. 15 Jahre später, im Jahr 1986, gelang dem Physiker und seinem Team dann der große Durchbruch: Die Forscher veränderten einen Laser so, dass er schwimmende dielektrische Kügelchen

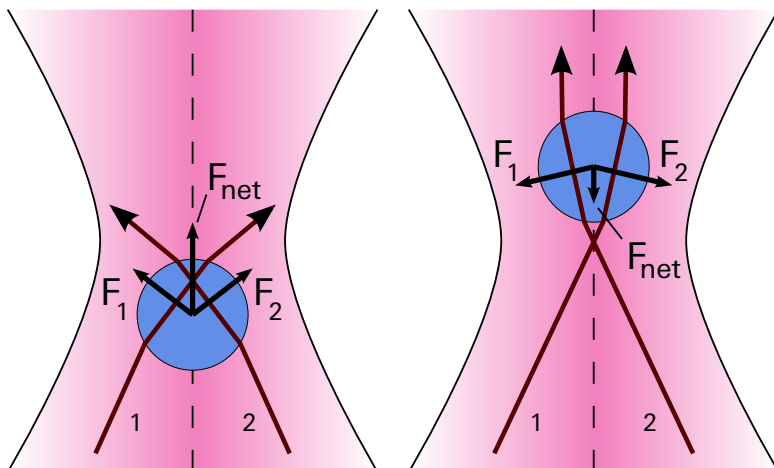
mit Durchmessern zwischen 0,025 und 10 Mikrometern entgegen der Ausbreitungsrichtung des Lichts bewege.

Das Geheimnis dieser optischen Pinzette besteht darin, dass der Experimentator das Laserlicht mit einer Linse auf einen Punkt fokussiert. Was dann geschieht, kann man am besten anhand eines Naturgesetzes veranschaulichen, das Isaac Newton bereits im 17. Jahrhundert formulierte. Dieser Impulserhaltung zufolge bleibt das Produkt aus Geschwindigkeit und Masse eines physikalischen Systems stets konstant. Stößt etwa auf einem Billardtisch eine Kugel auf eine andere, wird sie umgelenkt und verliert an Geschwindigkeit. Dafür setzt sich die andere Kugel in Bewegung.

Etwas Ähnliches passiert, wenn ein Laserstrahl, den man sich dazu als Strom winziger Lichtteilchen vorstellen kann, auf ein Plastikbällchen trifft. Einige der Partikel prallen an der Oberfläche ab und übertragen einen Teil ihres Impulses auf den sphärischen Körper, der sich daraufhin in Ausbreitungsrichtung des Lasers bewegt – der seit Langem bekannte Strahlungsdruck.

Bei der optischen Pinzette kommt noch einer weiteren, entgegengesetzter Effekt dazu: Ein Teil des Laserlichts dringt in das durchsichtige Kügelchen ein und wird dort leicht umgelenkt. Das wiederum verändert den Impuls der Lichtteilchen, was laut Newton kompensiert werden muss, damit der Gesamtimpuls des Systems erhalten bleibt. Effektiv versetzen die Laserstrahlen dem Bällchen dadurch einen winzigen Rückstoß (siehe Grafik unten). Platziert man die mikroskopisch kleine Kugel nun im

Die »optische Pinzette« fokussiert einen Laserstrahl (rosa), der hinter dem Brennpunkt wieder breiter wird. Treffen die Lichtteilchen auf ein Glaskügelchen (blau), dringen sie in das Material ein und werden leicht umgelenkt; dadurch übertragen sie einen Teil ihres Impulses auf das Kügelchen. Befindet sich dieses vor dem Brennpunkt (links), addieren sich die Impulsüberträge F_1 und F_2 zu einer Gesamtkraft F_{net} , die es in Strahlrichtung bewegen. Treibt die Kugel hinter dem Fokus, wirkt die Kraft entgegen der Ausbreitungsrichtung des Lichts (rechts).



ROLAND KOEHLER (COMMONS:WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:OPTICAL_TRAP_FOCUSED.svg) / CC BY 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/3.0/LEGALCODE); BEARBEITUNG: SPEKTRUM ÜBER WISSENSCHAFT

Jetzt die neuen Ausgaben!



Am Kiosk kaufen!

(www.mykiosk.com)

Als Probeabo plus kennenlernen!

Sonderausgabe „Das Böse“

+ reguläre Ausgaben im Jan. und Mrz. 2019

>>> online auf www.philomag.de/abo

>>> Tel. +49 (0)40 / 38 66 66 309

Brennpunkt der Linse, heben sich Strahlungsdruck und Rückstoß exakt auf. Das Partikelchen kann sich damit weder vor noch zurück bewegen. Es kann auch nicht in einer anderen Richtung aus dem Strahl entkommen: Bewegt es sich senkrecht zur Laserrichtung, wird es aus Gründen der Impulserhaltung wieder in Richtung Strahlmitte geschoben.

Dank der ausgeklügelten Erfindung konnten Forscher einige Jahre später sogar einzelne Atome festhalten – ein Kunststück, für das drei von Ashkins Kollegen um den späteren US-Energieminister Steven Chu bereits 1997 den Nobelpreis erhielten. Bei derart winzigen Objekten, die kleiner sind als die Wellenlänge des Laserlichts, ist es etwas schwieriger zu erklären, weshalb die optische Pinzette funktioniert. Vereinfacht kann man es sich so vorstellen, dass die elektromagnetische Welle des Lasers die Ladungsverteilung im Zielobjekt verändert und es dadurch stets ins Zentrum der Lichtfalle zieht.

Jahrzehntelang stagnierte die Laserphysik

Mitte der 1980er Jahre arbeiteten auch Gérard Mourou und seine Doktorandin Donna Strickland, die damals an der University of Rochester im US-Bundesstaat New York forschten, an einer Verbesserung der Lasertechnologie. Ihr Spezialgebiet waren jedoch nicht kontinuierlich arbeitende Laser, sondern solche, die Licht in kurze und möglichst starke Pakete zerteilen. Auf diesem Teilgebiet kamen Wissenschaftler damals nicht recht voran: Schon seit Ende der 1960er Jahre war es ihnen nicht mehr gelungen, die Zahl der Lichtteilchen in einem solchen Laserpuls weiter zu steigern.

Zwar konnte man die Intensität der Strahlungspakete vergrößern, indem man sie durch spezielle Verstärkerzellen jagte, in denen immer mehr Lichtteilchen dazustießen. Wollte man damit jedoch mehr als eine Billion Watt pro Quadratzentimeter erreichen, gingen die Verstärkerzellen kaputt. Mourou und Strickland stießen in einem populärwissenschaftlichen Artikel über die Radartechnologie auf den entscheidenden Gedanken: Die Geräte verstärken Radiowellenschnipsel enorm, um sie große Strecken überwinden zu lassen. Auch hier geht die Elektronik kaputt, wenn man die Strahlungspakete zu stark aufpumpen will. Ingenieure lösen das Problem seit Langem, indem sie die Pulse vor der Verstärkung in die Länge ziehen.

Wieso sollte der Trick nicht auch für kürzere Wellenlängen funktionieren, wie zum Beispiel die des sichtbaren Lichts, fragten sich Mourou und Strickland. Nach langwierigen Tests fanden der Franzose und die Kanadierin einen Versuchsaufbau, der das erwünschte Ergebnis lieferte: Sie lenkten einen Laserpuls mit einer Energie von wenigen milliardstel Joule durch einen 1,4 Kilometer langen Strang eines Glasfaserkabels.

Der niederfrequente Teil des Pulses bewegte sich darin etwas schneller als Schwingungsanteile mit höherer Frequenz, was das Wellenpaket in die Länge zog. Während der Puls anfangs 150 milliardstel Sekunden, war er nach der Passage durch das Glasfaserkabel doppelt so lang. Das

Mourou und Strickland ließen sich von Radaren inspirieren. Warum sollte sich Licht nicht genauso verstärken lassen wie Radiowellen?

machte den entscheidenden Unterschied: Bei einem längeren Puls musste in den Verstärkerzellen nicht mehr so viel Energie pro Zeiteinheit deponiert werden wie beim Aufpumpen eines kürzeren Laserschnipsels, was die Apparatur schonte.

Anschließend schoben Mourou und Strickland den Wellenzug wieder zusammen. Dazu jagten sie das aufgefächerte Licht durch ein Paar aus Beugungsgittern, die verschiedene Wellenlängen unterschiedlich stark umlenkten. Durch geschickte Anordnung der Gitter benötigten niederfrequente Wellen ein wenig länger durch den Aufbau als hochfrequente, was den Lichtpuls stark komprimierte. Nach der Behandlung hatte er nur noch eine Länge von zwei milliardstel Sekunden, enthielt aber ein Vielfaches der Lichtteilchen des ursprünglichen Strahlungspakets.

1985 veröffentlichte das Duo ihr als »Chirped Pulse Amplification« (CPA) bekanntes Verfahren in einem Fachmagazin – für die damals 26-jährige Strickland war es die erste wissenschaftliche Veröffentlichung überhaupt. Dank CPA, das mittlerweile in leicht abgeänderter Form in vielen Laboren angewendet wird, legten Laserpulse in den Folgejahren wieder deutlich an Leistung zu. Der Trend hält bis heute an: Die nächste Generation großer Laseranlagen, die momentan in Planung sind, soll hundertmillionenfach höhere Pulsintensitäten als ihre Vorgänger Mitte der 1980er Jahre erreichen.

Mourous und Stricklands Erfindung legte nicht nur die Basis für stärkere Laser. Mit CPA war es plötzlich auch möglich, deutlich mehr Pulse in Serie abzusetzen. Das bereitete letztlich einer anderen Laserrevolution den Weg: Forscher bestrahlen heute einzelne Atome mit maßgeschneiderten Lichtpaketen, die in hoher Frequenz Elektronen von ihren Atomkernen entfernen. Die negativ gepolten Ladungsträger legen kurz darauf den Rückwärtsgang ein und sausen mit großer Geschwindigkeit zurück in Richtung Kern. Dabei strahlen sie noch deutlich kürzere Lichtpulse ab, die gerade einmal ein Milliardstel einer milliardstel Sekunde währen.

Der Traum vom »Kino der Moleküle«

Mit Hilfe dieser Attosekundenpulse lassen sich mittlerweile die extrem schnellen Bewegungen von Elektronen wie in einem Film festhalten. Auf dem Weg zu diesem »Molekül-Kino« waren in den 2000er Jahren jedoch weitere, potenziell nobelpreiswürdige Arbeiten nötig – es ist also gut möglich, dass die Laserphysik in einigen Jahren erneut im Fokus des Stockholmer Komitees stehen wird. Der Nobelpreis 2018 wird auch deshalb in Erinnerung

bleiben, weil mit Donna Strickland eine Frau die höchste Auszeichnung der Wissenschaften erhalten hat. Sie ist erst die dritte Gewinnerin in der Geschichte des Physik-Nobelpreises und die erste seit 55 Jahren.

Daneben wurde dieses Jahr deutlich, dass das Nobelkomitee längst nicht nur Grundlagenforschung auszeichnen will, die zum Staunen anregt, wie etwa die 2017 prämierte Entdeckung von Gravitationswellen. Der Nobelpreis solle auch dazu dienen, Erfindungen zu würdigen, betonte die Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften bei der Bekanntgabe der Preisträger. Aus Sicht des Nobelkomitees sind die 2018 ausgezeichneten Entdeckungen geradezu Paradebeispiele dafür, wie physikalische Grundlagenforschung kaum sichtbar das Leben vieler Menschen verändern kann. So spielen präzise steuerbare Hochintensitätslaser, wie sie die CPA-Technik möglich gemacht hat, eine Schlüsselrolle bei Millionen Augenoperationen, die jedes Jahr stattfinden.

Auch Ashkins optische Pinzette sollte letztlich eine große Bedeutung außerhalb der Physik erhalten: Ende der 1980er Jahre begann der Amerikaner mit seinem Mini-Traktorstrahl lebende Zellen einzufangen. Zunächst töteten die energiereichen Strahlen die empfindlichen Organismen noch, nach einigen Anpassungen konnte Ashkin selbst schwimmende Viren und Bakterien intakt festhalten.

Seitdem haben Forscher die Methode weiterentwickelt; heute ist sie ein weit verbreitetes Verfahren zum Beobachten biologischer Prozesse. Forscher haben damit unter anderem die mechanischen Eigenschaften von DNA-Strängen untersucht und bessere Einsichten in das Verhalten so genannter Motorproteine gewonnen.

Ashkin ging 1992 in Ruhestand, forscht aber noch immer in einem bei sich zu Hause eingerichteten Labor. Er ist der älteste Laureat in der Geschichte der Nobelpreise. Als der 96-Jährige am Morgen des 2. Oktober vom Nobelkomitee angerufen wurde, soll er gesagt haben, er habe keine Zeit für Interviews, ein wichtiger neuer Fachaufsatz von ihm sei gerade in Arbeit. Der Sciencefiction nachzujagen, ist eben auch eine Frage der Prioritäten. ◀

Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

QUELLEN

Ashkin, A.: Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. In: Physical Review Letters 24, S. 156–159, 1970

Ashkin, A. et al: Observation of a Single-Beam Gradient Force Optical Trap for Dielectric Particles. In: Optics Letters 11, 288, 1986

Mourou, G., Strickland, D.: Compression of Amplified Chirped Optical Pulses. In: Optics Communications 56, S. 219–221, 1985



**STERNE UND
WELTRAUM**

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2019

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wie dem sichtbaren Licht oder dem Infrarotlicht. Die Aufnahmen stammen u. a. vom Weltraumteleskop Hubble, der Jupitersonde Juno und dem Very Large Telescope der ESO.

Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2019 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte.

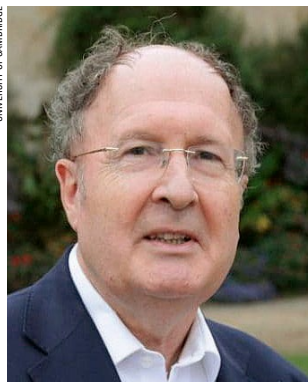
14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung;
Format: 55 x 46 cm; € 29,95 zzgl. Porto;
als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

HIER KÖNNEN SIE BESTELLEN:

Telefon: 06221 9126-743

www.sterne-und-weltraum.de/kalender

E-Mail: service@spektrum.de



Frances H. Arnold (links) hat die Linus-Pauling-Proessur für Chemie- und Biotechnik und Biochemie am California Institute of Technology in Pasadena inne. George P. Smith ist emeritierter Biologieprofessor an der University of Missouri in Columbia. Sir Gregory P. Winter (rechts) ist Gentechniker und Emeritus am Trinity College Cambridge (England).

NOBELPREIS FÜR CHEMIE EVOLUTION IM REAGENZGLAS

2018 geht der Nobelpreis für Chemie zur Hälfte an Frances Arnold für die gezielte Evolution von Enzymen sowie zur anderen Hälfte an George Smith und Gregory Winter für die Phagen-Display-Technik zur Herstellung von Peptiden und Antikörpern.

»Das Leben findet einen Weg«, bemerkt Jeff Goldblum im US-Blockbuster »Jurassic Park« treffend. Und Biologen wissen: Im Rahmen der Evolution stellten zufällige Veränderungen von vorhandenem Material sowie die Selektion der daraus resultierenden Varianten über Jahrtausende sicher, dass es keine notwendige biochemische Dienstleistung gibt, die nicht irgendein Spezialwerkzeug der Zellen effizient erledigt. Sich aus diesem Arsenal zu bedienen, haben Forscher seit Langem gelernt: Mit einer Vielzahl von Enzymen zerlegen und stricken sie chemische Verbindungen nach Bedarf. Das klappt ganz gut, hat aber lästige Grenzen. Im Arsenal finden sich eben nur Werkzeuge, die lebende Zellen brauchen; sie taugen jedoch nicht unbedingt für alle Aufgaben, die Menschen gern erfüllt hätten.

Es erscheint nahezu aussichtslos, sich solche Werkzeuge selbst passend zu schneiden. Zwar lassen sich Aminosäuren gezielt aneinanderreihen, um ein künstliches Proteinwerkzeug herzustellen – dabei kann es jedoch in der sich knäuelnden Kette zu unberechenbaren Effekten durch die vielfältigen Bausteine kommen. Eine Alternative liegt nahe: Lässt sich der Evolutionsprozess zu neuen, nützlichen Werkzeugen gezielt fördern, steuern und womöglich beschleunigen? Genau das gelingt heute im Labor, weil Frances Arnold, George Smith und Gregory Winter mit ihren Mitarbeitern den richtigen Fährten folgten. Dafür erhalten sie den diesjährigen Nobelpreis für Chemie.

Frances Arnold – geboren 1956 in den USA und erst die fünfte Frau auf der langen Liste der Chemie-Lauraeten – veröffentlichte 1993 ihren bahnbrechenden Beitrag zur gezielten Entwicklung eines Enzyms. Ihre Grundidee, Bakterien im Labor zu einer »evolutionären Maschine« umzubauen, hatte der deutsche Chemie-Nobelpreisträger

Manfred Eigen einige Jahre zuvor schon theoretisch skizziert.

Arnold versuchte zunächst, eine industriell besser nutzbare Variante des Enzyms Subtilisin zu finden. Dabei handelt es sich um eine bakterielle Protease, die sich mittlerweile etwa in Waschmitteln findet und dort Eiweißverschmutzungen in Kleidung beseitigt. Die gesuchte Variante sollte aber nicht nur, wie unter natürlichen Bedingungen, in wässrigen Lösungen, sondern auch im organischen Lösungsmittel Dimethylformamid funktionsfähig bleiben, obwohl dieses die räumliche Struktur von Proteinen angreift (»denaturiert«).

Wer zerlegt Kasein am besten?

Frances Arnold begann in den 1990er Jahren am California Institute for Technology in Pasadena damit, zufällige Mutationen in den genetischen Bauplancode des Enzyms einzufügen und die veränderten Gene in Bakterien-DNA einzuschleusen. Dann selektierte sie aus ihrer so geschaffenen bakteriellen Subtilisin-Bibliothek jene Varianten, die sich am besten dabei schlugen, das Testprotein Kasein im organischen Lösungsmittel zu zerlegen. Nur diese Versionen wählte sie für eine weitere Runde von Mutationen aus – und wiederholte den Selektionsprozess der jeweils geeignetsten Subtilisine noch weitere vier Runden. Am Ende hatte sie eine Enzymvariante kreiert, die nicht nur in

Lässt sich der Evolutionsprozess zu neuen, nützlichen Werkzeugen gezielt fördern, steuern und womöglich beschleunigen?

»Das ist Chemie, wie sie Menschen nicht so einfach zu Stande bringen«

Mit Hilfe gerichteter Evolution eröffnet Frances H. Arnold Enzymen ungeahnte Einsatzbereiche – eine Leistung, für die sie nun den Chemie-Nobelpreis verliehen bekam. **Spektrum** sprach mit ihr über ihre Forschung.

Frau Professor Arnold, Sie arbeiten daran, Enzyme umzufunktionieren und sie für neue Reaktionen nutzbar zu machen. Was bezwecken Sie damit?

Frances Arnold: Wir würden gern chemische Prozesse, die Abfälle produzieren, durch saubere, biologische ersetzen. Alle für diese Umwandlungen nötigen chemischen Reaktionen werden von Enzymen katalysiert. Das ist der entscheidende Punkt.

Wie gehen Sie bei der Suche nach geeigneten Enzymen vor?

Wir lassen uns zuerst von der Chemie inspirieren. Menschen haben viele interessante Prozesse entwickelt – zum Beispiel um ein Medikament herzustellen –, die Reaktionsschritte beinhalten, die es in der Natur nicht gibt. Wir ersetzen entweder diese einzelnen Schritte, indem wir Enzyme dazu bringen, diese Reaktionen zu katalysieren, oder wir ersetzen im Optimalfall den ganzen Prozess durch eine einzige enzymatische Katalyse.

Wenn ein Prozess mit klassischer Chemie mehrere Reaktionen benötigt, wie kann ein einziges Enzym dann alle diese Schritte katalysieren?

Enzyme sind großartig, weil sie so extrem selektiv sind. Sie können mit einem Teil des Moleküls Chemie betreiben und einen anderen Teil völlig unberührt lassen. Das heißt, man muss den anderen Teil des Moleküls nicht vor der gerade ablaufenden Reaktion schützen,

wie das in der klassischen Chemie nötig ist. Enzyme können auch Moleküle mit der richtigen Chiralität erzeugen – also der korrekten »Händigkeit« –, so dass man gleich die gewünschte Konfiguration erhält und keine Mischung. Wir wissen von Pharmazeutika, dass manchmal eine der Konfigurationen giftig ist und daher entfernt werden muss.

Haben Sie ein Lieblingsenzym, an dem Sie besonders gerne arbeiten?

Ja, ich mag Cytochrom-P450-Enzyme sehr gern.

Warum ausgerechnet diese Proteine?

Sie sind die erste Verteidigungslinie in der Leber, zum Beispiel, wenn wir Gifte einnehmen. Menschen haben etwa 50 davon, manche Pflanzen mehr als 100. Sie schaffen es, Sauerstoff in alle möglichen Moleküle einzufügen – dadurch lassen sich diese Substanzen schnell abbauen und ausscheiden. Das ist Chemie, wie sie Menschen nicht so einfach zu Stande bringen. Deshalb wollte ich diese Enzyme dazu bringen, auch andere, nichtbiologische Reaktionen zu ermöglichen.

Können Sie mir ein Beispiel für eine nichtbiologische Reaktion geben, für die Sie ein Enzym entwickelt haben?

In der Biologie findet man keine Silizium-Kohlenstoff-Bindungen. Aber Menschen entwickeln sie im Labor die ganze Zeit. Also haben wir natürliche Enzyme gesucht, die zumindest ein wenig Bereitschaft zeigen, Kohlenstoff-Silizium-Bindungen durch eine spezielle Reaktion namens Carben-Insertion zu bilden. Und tatsächlich: Wir entdeckten, dass Cytochrom-C – das ist ein Elektronentransferprotein –

die Reaktion so gut katalysiert wie die besten menschengemachten Katalysatoren.

Das natürliche Enzym funktioniert also bereits genauso gut wie chemische Verfahren?

Ja. Und durch gerichtete Evolution machten wir es zu einem 15-fach besseren Katalysator als alle von Menschen ersonnenen – die zudem noch seltene Metalle verwenden. Cytochrom-C benutzt dagegen Eisen, das häufigste der Übergangsmetalle, und katalysiert trotzdem besser.

Welche möglichen Anwendungsgebiete sehen Sie für Enzyme mit nichtbiologischen Funktionen in den nächsten zehn Jahren?

Sie werden sicher immer mehr in der organischen Synthese auftauchen, um komplexe chemische Prozesse zu vereinfachen. Ein etwas weniger offensichtlicher Bereich wäre der Ersatz von Reaktionen, die bisher nur mit nass-chemischen Methoden möglich waren. Niemand in der siliziumorganischen Industrie dachte zuvor überhaupt an biologische Methoden. Jetzt sehen die Chemiker dort aber, dass Enzyme auch hier nützlich sein könnten und dabei edle Metalle wie Platin durch Allergewaltmetalle wie Eisen ersetzt werden können. Selbst wenn sie noch nicht mit Bakterien arbeiten, hat es mit Sicherheit ihre Fantasie beflügelt.

Gibt es auch Gefahren, wenn man Enzyme an Stelle von Chemikalien nutzt?

Die einzige Gefahr, die mir einfällt, ist, die Abfallindustrie in den Ruin zu treiben [lacht].

Die Fragen stellte **Michaela Maya-Mrschik**.

Dimethylformamid funktionierte, sondern dort sogar 256-mal aktiver war als das ursprüngliche Enzym in wässriger Lösung. Die neue Form verdankte ihre Eigenschaften dabei zehn ganz bestimmten, scheinbar willkürlich im Ursprungscode verteilten Mutationen. Deren kombinierten Effekt hätte vor dem Experiment so niemand voraussehen können.

Per Zufall und gerichteter Selektion von mutierten Varianten kommt man also auch im Labor verblüffend schnell sehr weit. Es genügt dabei zu wissen, was man will; wie es sich erreichen lässt, muss nicht bekannt sein. Mittlerweile haben viele Mitstreiter weltweit die Methode noch entscheidend verbessert.

Verknüpfen von Kohlenstoff und Silizium

Auch Arnolds Team arbeitet weiter damit: 2017 evolvierte ihr Team Häm-Proteine von *Escherichia coli*-Bakterien in Hochleistungsvarianten, die wesentlich effizienter als bisher verwendete künstliche Katalysatoren organische Kohlenstoff-Silizium-Verbindungen knüpfen (siehe Interview S. 31). Diese werden zum Beispiel in einigen neuartigen Medikamentenwirkstoffen benötigt. Andere Gruppen arbeiten an Enzymen, die bisher schwer katalysierbare Reaktionen ermöglichen sollen: Sie möchten zum Beispiel den Reaktionsweg beschleunigen, der Zucker schnell und effizient zu leichter verbrennbaren Alkoholen für Biotreibstoffe umsetzt.

Die drei Laureaten schufen die Grundlage zur effizienten Herstellung wirksamer biologischer Werkzeuge

Die zweite Hälfte des Chemie-Nobelpreises geht an George Smith und Gregory Winter, die einen anderen Weg gefunden und ausgebaut haben, biochemische Evolutionsprozesse kontrollierbar für die Wissenschaft einzuspannen. Der 1941 geborene US-Amerikaner Smith, heute an der University of Missouri, hatte schon Anfang der 1980er Jahre mit Bakteriophagen gearbeitet – Viren, die sich in Bakterien vermehren und als einigermaßen simpel handhabbares Werkzeug gelten, um unterschiedliche Gene in Zellen einzuschleusen. Smith kam aber auf einen anderen Gedanken und wurde damit zu einem Vater der so genannten Phagen-Display-Technik: einer vielfältig nützlichen biotechnologischen Methode, bei der heute mit Bakteriophagen die Funktion von neu geschaffenen Proteinen geprüft wird.

Smith pflanzte den DNA-Code für einen Teil des zu untersuchenden Eiweißstoffs in ein Hüllprotein-Gen der Phagen-DNA. Das Proteinfragment wird daraufhin mit samt Hüllprotein auf der Außenseite der bei der Vermehrung entstehenden neuen Phagen eingebaut. Diese lassen sich daher mit passenden Antikörpern herausfischen.

Ursprünglich diente die Methode dazu, Proteine zu identifizieren und anzureichern. Seit den 1990er Jahren testen Wissenschaftler weltweit mit ähnlichen Ansätzen die Eigenschaften von verschiedenen Biomolekülen; und es entstanden laufend Phagen-Display-Bibliotheken, mit denen viele Antigen-Antikörper-Reaktionen gleichzeitig gescannt werden können.

Profitiert hat von der nobelpreiswürdigen Idee auch Gregory Winter, geboren 1951 in England und an der Cambridge University tätig. Ende der 1980er Jahre drehte er Smiths Vorbild einfach um: Er schleuste den antigenbindenden Teil von Antikörpern in den Phagenhüllprotein-Code, so dass die Phagen diesen Antikörper an ihrer Oberfläche produzierten. Solche Antikörper-Phagen konnte Winter mit Antigen-Anglerhaken gezielt herausfischen.

In der Folge testete er kleine und größere zufällige Veränderungen von mutierten Antikörpern sowie dazu passenden Antigenen und erstellte Bibliotheken mit Milliarden unterschiedlicher Varianten. Analog zu Frances Arnold und ihren Enzymen selektierte er besonders potente Kandidaten von Antikörpern und unterzog diese dann weiteren Evolutions- und Selektionsschritten. So konnte er nach und nach zum Beispiel Antikörper produzieren, die sehr spezifisch nur an Krebszellen oder an Aidsviren binden. Auf diesen Arbeiten gründet etwa die Entwicklung von Adalimumab, das gegen Rheuma und Entzündungsreaktionen eingesetzt wird und 2002 als erster rein menschlicher monoklonaler Antikörper zugelassen worden ist.

Anwendungen von Anthrax bis Alzheimer

Das Ende der Entwicklung ist noch nicht abzusehen: Ständig werden Varianten von Antikörpern mit Phagen-Displays unter die Lupe genommen, und viel versprechende Kandidaten gelangen in die klinischen Testphasen. Untersucht werden beispielsweise Antikörpervarianten, welche die Killerzellen des Körpers gegen Tumoren scharfmachen, sich gegen das Bakterientoxin Anthrax richten oder die Alzheimererkrankung bremsen sollen. Die drei Laureaten schufen somit die Grundlage zur Herstellung wirksamer biologischer Werkzeuge und lösten damit, wie das Nobelpreiskomitee findet, eine »(R)Evolution der Chemie« aus. ◀

Jan Osterkamp ist promovierter Biologe und Redakteur bei »Spektrum.de«.

QUELLEN

Chen, K., Arnold, F.H.: Tuning the Activity of an Enzyme for Unusual Environments: Sequential Random Mutagenesis of Subtilisin E for Catalysis in Dimethylformamide. In: PNAS 90, S. 5618–5622, 1993

McCafferty, J. et al.: Phage Antibodies: Filamentous Phage Displaying Antibody Variable Domains. In: Nature 348, S. 552–554, 1990

Smith, G.P.: Filamentous Fusion Phage: Novel Expression Vectors that Display Cloned Antigens on the Virion Surface. In: Science 228, S. 1315–1317, 1985



Der US-Amerikaner Paul Romer (links) ist Professor für Wirtschaftswissenschaft an der Stern School of Business der New York University. Im September 2016 wurde er Chefökonom der Weltbank. Bereits im Januar 2018 kehrte er jedoch nach einer heftigen Kontroverse an die New York University zurück. Sein Landsmann William D. Nordhaus (rechts) ist Professor für Wirtschaftswissenschaft sowie für Forstwirtschaft und Umweltwissenschaften an der Yale University. Von 1977 bis 1979 gehörte er zu den wirtschaftlichen Beratern von Präsident Jimmy Carter.

NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN INNOVATION UND KLIMA ALS ÖKONOMISCHE FAKTOREN

Die schwedische Reichsbank verleiht den Preis für Wirtschaftswissenschaft im Gedenken an Alfred Nobel an William D. Nordhaus und Paul Romer »für die Integration des Klimawandels« beziehungsweise »technischer Innovationen in die makroökonomische Langzeitanalyse«.

► »Makroökonomisch« und »Langzeit«: Das bedeutet einen speziellen, sehr abstrakten Blick auf das Wirtschaftsgeschehen. Es geht nicht um das Verhalten eines einzelnen Wirtschaftssubjekts, nicht einmal um das Schicksal ganzer Branchen. Die gesamte Aktivität einer Volkswirtschaft wird in einer einzigen Funktion zusammengefasst, der »Produktionsfunktion«. x Einheiten Arbeit im Zusammenspiel mit y Einheiten Kapital – sprich Produktionsmittel – bringen $f(x, y)$ Ertrag. Der wird zum Teil konsumiert, zum anderen Teil investiert, das heißt in neue Produktionsmittel umgesetzt.

Dieses mathematische Modell gibt der Rede von der Gleichheit aller Menschen einen etwas ungewohnten Sinn: Alle sind zugleich Arbeiter, Konsumenten und Kapitalisten. Sie handeln so, dass sie ihren langfristigen Nutzen maximieren. Dabei haben sie durchaus auch den Nutzen ihrer Nachkommen im Sinn.

Das Wirtschaftsgeschehen spielt sich auf einem perfekten Markt ab: Arbeit und Kapital fließen stets dorthin, wo sie am meisten einbringen. Deswegen strebt das ganze System auf die Dauer einem Gleichgewicht zu, einem Optimum identisch mit dem, das ein wohlwollender, allwissender und allmächtiger Wirtschaftsplaner verordnen würde. Solche Ideen bilden den Grundstock des neoklassischen Wachstumsmodells, für das Robert M. Solow 1987 den Wirtschaftsnobelpreis bekam und das inzwischen in die Lehrbücher eingegangen ist.

Offensichtlich lässt das Modell viele Einzelheiten der wirtschaftlichen Realität außer Acht – so sehr, dass der Versuch, für ein konkretes Land und einen bestimmten Zeitraum die Werte von x , y und f in Dollar zu bestimmen, zum Scheitern verurteilt ist. Die beiden aktuellen Preisträger haben gewisse bedeutende Faktoren »in das Modell hineingeholt« und es damit der Realität nähergebracht.

Selbst in seiner Urform erlaubt das Modell gewisse qualitative Folgerungen. Eine von ihnen lautet: Ärmere Länder, also solche mit geringer Kapitalausstattung, wählen zunächst größere Wachstumsraten für das Kapital auf Kosten des Konsums, bis sie ihren Rückstand einigermaßen aufgeholt haben. Eine weitere Folgerung besagt, dass im Gleichgewichtszustand das Wirtschaftswachstum allein durch den technischen Fortschritt getrieben wird. Genauer: Die Gesamtwirtschaftsleistung $f(x, y)$ wächst proportional zur Produktivität pro Arbeitsstunde.

Die zweite Folgerung wird durch Daten aus der US-amerikanischen Volkswirtschaft glänzend bestätigt. Die erste Folgerung ist dagegen offensichtlich falsch. Vielleicht kommt der technische Fortschritt in manchen Ländern später an als in anderen, was sich in einem vorübergehenden Einbruch in deren Wachstumskurve zeigt. Aber über Jahrzehnte hinweg ist die Wirtschaft von Singapur mit knapp acht Prozent pro Jahr gewachsen, während die des Tschad jedes Jahr um mehr als zwei Prozent sank, so dass die Schere zwischen Arm und Reich sich immer weiter öffnete. Das lässt sich beim besten Willen nicht mit dem neoklassischen Wachstumsmodell in Einklang bringen.

Auch Forschung und Entwicklung sind wirtschaftliche Aktivitäten

Paul Romer setzt an einer spezifischen Schwäche des Modells an. Technischer Fortschritt ist bei Solow und seinen Nachfolgern eine exogene Größe, das heißt, er beeinflusst zwar das Wirtschaftsgeschehen, ist aber selbst nicht Bestandteil des Modells. Damit hat er denselben Status wie ein Naturereignis. Das widerspricht der Realität. Es gibt technischen Fortschritt, weil Wirtschaftssubjekte – typischerweise große Firmen – Forschungs- und Entwicklungsaufwand betreiben. Das tun sie nur dann,

wenn sie sich davon einen Gewinn versprechen. Der ist jedoch dadurch gefährdet, dass ein Konkurrent eine einmal entwickelte Innovation leicht kopieren und so den Innovator unterbieten kann; er muss ja keine Entwicklungskosten hereinholen. Also wird die ganze Entwicklung nicht stattfinden, es sei denn, der Innovator kann auf legalem (Patente) oder technischem Weg (etwa durch Softwareverschlüsselung) ein Monopol für sein Werk etablieren.

Obendrein baut eine Innovation auf einem allgemeinen Wissensstand auf und trägt zu diesem bei. Damit wird der Staat in zweifacher Rolle zum Bestandteil des Systems: als Garant für die Durchsetzbarkeit von Patentansprüchen und als Bereitsteller des allgemeinen Wissens, auf dem der technische Fortschritt überhaupt erst gedeihen kann. All dies kann Romer durch mathematische Erweiterungen von Solows Modell abbilden.

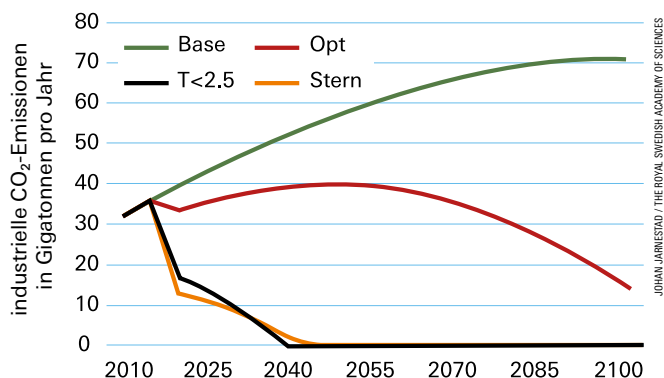
Unter den abermals qualitativen Ergebnissen ist eines besonders interessant: Wenn alle Menschen – die nach wie vor zugleich Arbeiter, Kapitalisten und Konsumenten sind – ihren Nutzen optimieren, dann kommt ein zu geringer Aufwand für Forschung und Entwicklung heraus, verglichen mit dem Optimum des fiktiven allmächtigen Planers. Um dieses Marktversagen auszugleichen, sollte der Staat die Forschung subventionieren; für einen Neoliberalen ein eher ungewöhnliches Ergebnis.

Angesichts der überragenden Rolle der mathematischen Modellierung, die Romers Arbeiten kennzeichnet, ist es beruhigend zu erfahren, dass Romer selbst sich aufs Heftigste gegen die »mathiness« wendet. So nennt er die Neigung seiner Fachkollegen, Triviales, Ungerechtfertigtes oder schlichten Unfug hinter einer Wolke von mathematischem Formalismus zu verbergen und dadurch mit dem Anschein von Seriosität zu versehen. Die mathematische Formulierung allein sagt noch nicht, dass das zugehörige Modell wesentliche Teile der Realität wiedergibt.

Vom Preis für Ackerland bis zur CO₂-Steuer

William D. Nordhaus erweitert das neoklassische Modell um den Einfluss der Natur. Das leuchtet auf den ersten Blick ein. Unsere wirtschaftlichen Aktivitäten, vor allem das Verbrennen von Kohle, Öl und Erdgas, beeinflussen das Klima; umgekehrt droht die Erderwärmung unser Leben zum Schlechteren zu verändern, was ein Ökonom sogleich in Kosten umrechnet. Also gilt es ein globales Modell zu entwickeln, das beide Wirkungen beschreibt, und dessen langfristige Gleichgewichtszustände zu finden.

Das scheint zunächst auf unüberwindliche Schwierigkeiten zu stoßen. Klimarechnungen sind ihrer Natur nach völlig verschieden von ökonomischen Modellen, erstens weil Wirtschaftssubjekte im Gegensatz zu Luftmolekülen ihr Verhalten von der Erwartung abhängig machen, wie es ihnen und ihresgleichen in der Zukunft ergehen wird. Zweitens ist der Zusammenhang zwischen der Aktivität einer Volkswirtschaft – zu messen beispielsweise am Bruttosozialprodukt – und ihrem CO₂-Ausstoß alles andere als einfach. Und wie soll man drittens die Wirkungen des Klimawandels auf die Menschen in Dollars quantifizieren?



Je nach Optimierungskriterium liefert die 2016er Version des Modells DICE verschiedene Prognosen für den globalen CO₂-Ausstoß. »Base« entspricht der Anwendung der aktuellen Vorschriften entsprechend einer Steuer von 2 Dollar pro Tonne, »Opt« dem von William D. Nordhaus angesetzten Wohlfahrts-optimum für Gegenwart und Zukunft, »T<2.5« demselben mit der Zusatzbedingung, dass die globale Temperatur um höchstens 2,5 Grad gegenüber dem Mittelwert von 1900 steigt, und »Stern« dem Optimum unter Anwendung der Diskontrate von 0,1 Prozent, wie sie der »Stern Report« zu Grunde legt.

Nordhaus hat es trotzdem versucht. Sein sehr globales Modell DICE (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy), das er erstmals 1994 veröffentlichte und seitdem ständig verfeinert, hat Eingang in die Arbeiten des Weltklimarats IPCC gefunden. Und da eine Durchschnittsbildung über die ganze Erde doch wesentliche Dinge außer Acht lässt, lieferte Nordhaus noch eine regionalisierte Version namens RICE (Regional dynamic Integrated model of Climate and the Economy) nach, in der die Welt immerhin in acht verschiedene Wirtschaftsräume eingeteilt wird.

Wie berechnet man den Einfluss des Klimawandels auf die unmittelbar Betroffenen, sprich die Landwirtschaft? Man kann beobachten, um wie viel Prozent zum Beispiel die Weizenernte zurückgeht, wenn die Temperatur um ein Grad steigt. Aber das unmittelbar in die Bilanz einzurechnen, würde den Schaden überschätzen. Der Landwirt könnte ihn ja mindern, indem er von Weizen auf Mais wechselt, der bei höheren Temperaturen gedeiht. Aussagekräftiger ist der (Verkaufs- oder Pacht-)Preis für landwirtschaftliche Flächen in Abhängigkeit von der Temperatur, denn in ihn gehen die Ertragsersparungen der Beteiligten ein.

Solche Zahlen lassen selbst bei der schmalen Datenbasis von zwölf Jahren auf gewisse Trends schließen, liefern allerdings nur eine äußerst grobe Schätzung für die globalen Effekte des Klimawandels, wie Nordhaus selbst zu betonen nicht müde wird. Aber Mathematik ist geduldig: Nordhaus fügt in die Schadensbilanz einen Term ein, der sehr große Werte annimmt, wenn die Temperatur um mehr als beispielsweise zwei Grad ansteigt, mit zwei freien

Parametern, die zur Anpassung an die empirische Realität dienen. Für einen solchen »Katastrophenterm« gibt es keine physikalische Begründung; vielmehr bildet er die – ihrerseits wohlbegründete – Befürchtung der Klimaforscher ab, dass jenseits von zwei Grad große Unsicherheiten und möglicherweise sogar katastrophale Umschwünge drohen.

Für den globalen Kohlendioxidkreislauf nimmt Nordhaus den einfachsten denkbaren funktionalen Zusammenhang: Was ein CO₂-Reservoir an die anderen abgibt, ist proportional zu dessen eigenem CO₂-Gehalt. Die Proportionalitätsfaktoren wählt er so, dass die Daten aus der Vergangenheit richtig herauskommen. Vereinfachungen dieser Art würden jedem Klimatologen die Haare zu Berge stehen lassen. Gleichwohl bekommt Nordhaus insgesamt ein Modell, das Gesichertes wie Ungesichertes immerhin irgendwie wiedergibt und für Revisionen auf Grund besseren Wissens jederzeit offensteht.

Am Ende sucht man ein Maximum einer Nutzenfunktion, und zwar für gegenwärtige ebenso wie für zukünftige Generationen. Dabei wird, wie üblich, der Nutzen diskontiert, das heißt umso geringer bewertet, je ferner er in der Zukunft liegt: eine Art negativer Verzinsung. Liegt diese Diskontrate bei 0,1 Prozent, wie sie der einflussreiche »Stern Review« (Stern, N.: The Economics of Climate Change, Cambridge University Press 2007) ansetzt, dann

ist uns das Schicksal der Menschen in 500 Jahren ungefähr 0,6-mal so viel wert wie unser eigenes. Bei einem Satz von 1,5 Prozent, der ungefähr dem entspricht, wie der Durchschnittsmensch zu handeln pflegt (**Spektrum Highlights** 3/2015: »Wie entscheiden wir?«, S. 28), ist das Gewicht nur noch 0,0005. Durch die Wahl der Diskontrate fließen also ethische Gesichtspunkte in das Modell ein.

Bei aller Unvollkommenheit liefert das Modell von Nordhaus konkrete Antworten auf aktuelle Fragen. So lässt sich der volkswirtschaftliche Schaden berechnen, den die Emission einer zusätzlichen Tonne Kohlendioxid verursacht. Unter der Voraussetzung des Marktgleichgewichts ist dieser gleich dem Preis, den der Verursacher dafür zahlen muss – ob in Form einer Steuer oder eines handelbaren Emissionsrechts, ist zweitrangig. Je nach der Wahl der Parameter und des Optimierungskriteriums ergeben sich unterschiedliche Werte. Nordhaus selbst kommt mit seinem Modell ohne Katastrophenterm auf relativ milde 30 Dollar pro Tonne, die bis 2050 auf 150 Dollar steigen (ohne Berücksichtigung der Inflation). Wer allerdings ein Limit von 2,5 Grad einhalten will oder mit einer Diskontrate von 0,1 Prozent weit in die Zukunft denkt, muss bereits heute um die 200 Dollar pro Tonne verlangen und das bis 2050 auf 600 bis 1000 Dollar steigern. ◀

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

Spektrum PLUS⁺

DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

Exklusive Vorteile und Zusatzangebote für alle Abonnenten von Magazinen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

- Download des Monats im Dezember: **Spektrum KOMPAKT** »Schokolade«
- Ermäßigter Preis auf ornithologische Reisen in Deutschland und Europa aus dem Programm von birdingtours
- Veranstaltungen der neuen Reihe **Spektrum LIVE** zum Vorteilspreis

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

VORSCHAU

Spektrum PLUS & LIVE 2019

Redaktionsbesuche
in Heidelberg

Leserexkursionen zu
Forschungseinrichtungen wie z. B.
EUMETSAT (Darmstadt)

Vorträge von **Spektrum**-Redakteuren
z. B. zum Thema »Vogelsterben:
Kehrt der stumme Frühling wieder?«
am 20. Februar in Heidelberg

Veranstaltungen zu den Themen
»3-D-Druck« und »Pasta, Pomodore,
Parmigiano: Physik pur«

*Abonnieren Sie unseren Newsletter und Sie
verpassen keinen Termin!*

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

Jetzt bei Ihrem
Zeitschriftenhändler!



Print | 5,90 €
Download | 4,99 €

www.spektrum.de/aktion/ki



SPRINGERS EINWÜRFE IMMER ÄRGER MIT DEN QUANTEN

Der Streit um die Deutung der Quantenphysik nimmt kein Ende. Ein neues Gedankenexperiment scheint zu beweisen, dass die Theorie sich manchmal selbst widerspricht.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine Sammlung seiner Einwürfe ist als Buch unter dem Titel »Unendliche Neugier. Was die Wissenschaft treibt« erschienen.

» spektrum.de/artikel/1603744

Wer sich für Quantentheorie interessiert, kennt die von Erwin Schrödinger 1935 erdachte Katze. Sie steckt in einer Kiste, wo sie ein Quantenmechanismus in eine Zustandsüberlagerung von Leben und Tod versetzt. In dem gespenstischen Zwischenreich verharrt sie, bis ein Beobachter die Kiste öffnet und den Quantenzustand misst. Erst jetzt ist sie entweder lebendig oder tot. Das Gedankenexperiment spitzt die umstrittene Frage zu, wie aus einer quantenmechanischen Wahrscheinlichkeitsverteilung ein klassisches Messresultat hervorgehen kann.

Um das Problem noch zu verschärfen, setzte der Theoretiker Eugene Paul Wigner 1961 zusätzlich zur Katze einen menschlichen Beobachter in die Kiste, der bald »Wigners Freund« genannt wurde. Während dieser stets unmittelbar erkennt, ob das Tier lebt oder tot ist, herrscht für einen äußeren Beobachter, solange die Kiste nicht geöffnet wird, drinnen eine zweideutige Zustandsüberlagerung von Wigners Freund und Schrödingers Quantenkatze. Scheinbar kommen beide Beobachter zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen.

Heute argumentieren die Physiker gegen solche Gedankenspiele mit dem Begriff der Dekohärenz, den Heinz-Dieter Zeh 1970 eingeführt hat. Infolge der Wechselwirkung der Quantenkatze mit den Luftatomen in der Kiste kollabiert der »kohärente« Überlagerungszustand von Leben und Tod fast augenblicklich zum Entweder-oder. Die Dekohärenz erzwingt ganz unabhängig davon, ob ein Mensch den Zustand misst oder nicht, sofort ein eindeutiges Resultat, das daher von draußen nicht anders aussieht als für Wigners Freund drinnen. Das Öffnen der Kiste macht keinen Unterschied.

Doch nun haben Daniela Frauchiger und Renato Renner von der ETH Zürich ein Gedankenexperiment ausgeheckt, das gleich zwei Kisten mit Wigners

Freunden vorsieht, zwischen denen ein gewisser Informationsaustausch stattfinden darf. Durch eine sehr komplizierte Argumentation behaupten die Theoretiker daraus herleiten zu können, dass in diesem Fall zwei äußere Beobachter zu gegensätzlichen Aussagen kämen – und somit wäre die Quantenphysik in sich widersprüchlich (*Nature Communications*, 3711, 2018).

Die gewundene Beweisführung lässt sich freilich nur sehr mühsam verfolgen. Immerhin hat die Arbeit unter Grundlagenforschern für einige Unruhe gesorgt und zu Versuchen geführt, den Autoren Denkfehler nachzuweisen – was aber anscheinend bisher nicht gelungen ist.

Praktizierende Physiker werden sich davon ohnehin kaum aus der Ruhe bringen lassen. Sie könnten auf dem Standpunkt stehen, eigentlich gereiche es der Quantenmechanik sogar zur Ehre, dass sie sich nur mit so extrem umständlichen Tricks zu Widersprüchen verleiten lässt.

Dennoch zeigt der umstrittene Artikel möglicherweise ein echtes Problem auf, das künftig praktische Konsequenzen haben könnte. Die Autoren betonen nämlich, ihre Beweisführung träfe genauso zu, wenn man an die Stelle der menschlichen Beobachter lauter Quantencomputer setzte. Dann aber dürften solche Maschinen, falls sie eines Tages tatsächlich in großem Stil zum Einsatz kämen, nicht ohne Weiteres miteinander vernetzt werden. Ob man sie nun in Serie schalten würde oder parallel arbeiten ließe, jedenfalls entstünden komplexe Verbände von Schrödinger-Katzen und Wigner-Freunden – und ob solche Quantencomputercluster überhaupt widerspruchsfreie Rechenergebnisse auswerfen können, erscheint im Licht des neuen Gedankenexperiments als eine berechtigte Frage.

ENDOMETRIOSE GEWEBE AUF ABWEGEN

Millionen Frauen leiden unter einer häufig verkannten Krankheit, bei der sich Zellen aus der Gebärmutter-schleimhaut im Körper ausbreiten und mitunter starke Schmerzen verursachen.

KAREN HANCOCK



Jena Pincott ist Biologin und Wissenschaftsautorin in New York (USA). In ihren Artikeln und Büchern beschäftigt sie sich vor allem mit den verborgenen oder auch skurrilen Seiten der Wissenschaft.

► spektrum.de/artikel/1603746

Jede Frau mit Endometriose kann ihre eigene Geschichte über den Moment erzählen, als ihr klar wurde, dass diese Bauchschmerzen nicht normal sind. Bei Emma geschah es, als sie eines Tages in der zehnten Klasse während des Geschichtsunterrichts ohnmächtig wurde. Sie fühlte sich wie ein Kürbis, der von innen her ausgehöhlt wird. Ihr Frauenarzt vermutete außergewöhnliche Menstruationskrämpfe und verschrieb Antibabypillen. Das half nur wenig. »Er gab mir das Gefühl, ich wäre verrückt«, meint Emma, die inzwischen Ende 30 ist und ihren richtigen Namen nicht nennen möchte. »Erst später begriff ich: Wenn eine Frau ein unklares medizinisches Problem hat, glaubt man ihr einfach nicht.«

Es dauerte sechs Jahre, bis ein Arzt durch eine Bauchspiegelung die Ursache der Schmerzen entdeckte. Jetzt wusste Emma, dass sie unter Endometriose leidet – einer Krankheit, bei der sich Gewebe der Gebärmutter-schleimhaut (Endometrium) in anderen Teilen des Körpers festsetzt (siehe »Eine schmerzhaftes Invasion«, S. 40). Emmas Bauchorgane waren mittlerweile wie von einem Rankengeflecht umschlungen.

Vergleiche aus der Pflanzenwelt erscheinen bei der Beschreibung der Endometriose durchaus angebracht. Wie eine Schlingpflanze, die sich um Bäume und Sträucher windet, breiten sich versprengte Gebärmutter-schleimhautzellen aus und hinterlassen vernarbtes Gewebe. Bauchorgane wie Blase, Darm oder Harnleiter können dabei befallen sein. Auch nach einer chirurgischen Entfernung wachsen schadhafte Stellen häufig wieder nach; mehr als die Hälfte der operierten Frauen müssen sich innerhalb von sieben Jahren einem zweiten Eingriff unterziehen. Den Chirurgen offenbart sich dann mitunter beim Öffnen des Bauchraums ein Netz aus vernarbtem Gewebe,

das Darm, Eierstöcke und Nerven umhüllt oder die Eileiter derart zusammenquetscht, dass eine Eizelle nicht mehr hindurchpasst.

Trotz ihrer dramatischen Auswirkungen bleibt die Endometriose rätselhaft. Ärzte wissen, dass sie familiär gehäuft vorkommt und mit mehreren genetischen Varianten gekoppelt ist – die Erblichkeit beträgt schätzungsweise 50 Prozent –, aber Gene allein können weder ihr Auftreten erklären noch ihren Verlauf vorhersagen. Das Ausmaß der Narbenbildung sowie die Zahl und Lage der Schadstellen korrelieren kaum mit der Schwere der Symptome, zu denen neben Schmerzen auch starke Blutungen, Beschwerden beim Geschlechtsverkehr oder beim Stuhlgang sowie häufig Unfruchtbarkeit zählen. Mancher Patientin helfen Operationen und Medikamente; andere hingegen, bei denen nur wenig Gewebe betroffen ist, haben schon alles ausprobiert und leiden dennoch unter ständigen Schmerzen.

Rückfluss mit Folgen

»Als Erstes stellt sich die Frage: Wie kommt das Gewebe aus der Gebärmutter heraus?«, sagt die Bioingenieurin Linda Griffith vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge (USA). Die wissenschaftliche Leiterin des MIT Center for Gynaepathology Research leidet selbst an Endometriose und ist von dem Rätsel fasziniert, das sich der Wissenschaft schon seit Jahrzehnten stellt: Niemand weiß genau, wie oder warum Gebärmutter-schleimhautzellen außerhalb ihres eigenen Organs auftauchen.

Die vorherrschende Theorie der retrograden Menstruation stellte der US-amerikanische Gynäkologe John Sampson (1873–1946) bereits vor fast 100 Jahren auf. Er beobachtete, dass Menstruationsflüssigkeit mit Uteruszellen zurück in die Eileiter fließen kann. Kleine Mengen davon,

AUF EINEN BLICK REGELMÄSSIGE QUALEN

- 1** Bei Endometriose siedeln sich Zellen aus der Gebärmutter Schleimhaut in anderen Körperregionen an. Das Gewebe schwillt mit der weiblichen Periode an und kann dabei starke Schmerzen verursachen.
- 2** Weltweit leiden rund zehn Prozent aller Frauen im gebärfähigen Alter unter Endometriose. Betroffene und auch viele Ärzte verkennen jedoch oft die Krankheit und gehen von Menstruationsbeschwerden aus.
- 3** Das Leiden wurde bislang wenig erforscht, die Ursachen liegen noch im Dunkeln. Es lässt sich nur schwer behandeln; selbst eine operative Entfernung der Geschwulste hilft nicht immer.

so seine Vermutung, bleiben an den Organen und der Innenhaut des Bauchraums haften oder schwimmen in der Bauchflüssigkeit und verbreiten sich auf weiter entfernte Stellen. Das passiert bei nahezu jeder Frau, wird allerdings in der Regel vom Immunsystem wieder behoben. Manchmal jedoch setzen sich nach Sampsons Hypothese die Zellen dort fest, wo sie zufällig gelandet sind. Das falsch platzierte Gewebe verhält sich dann wie in der Gebärmutter: Es bringt Hormonrezeptoren hervor und spricht auf die Signale an. Wie die Gebärmutter Schleimhaut wächst es jeden Monat an, schüttet Hormone aus und wird zum Ende des Zyklus abgestoßen. Aber anders als bei der Menstruation bleiben Blut und Gewebe im Beckenraum gefangen und lösen hier Entzündungen aus, was im Lauf der Zeit zu Narbenbildung und Verklebungen führt.

Doch seit Sampsons Zeit streiten sich die Wissenschaftler über die eigentliche Ursache der Krankheit. Sind die abtrünnigen Gebärmutter Schleimhautzellen die Schuldigen, die woanders gewissermaßen als Samen sprießen, oder liegt es am Umfeld im Bauchraum, das diesen Zellen den Boden bereitet? Mediziner auf der Seite der Samentheorie machen defekte Endometrium- oder Stammzellen verantwortlich. Für die Verfechter der Bodentheorie stellt Endometriose vor allem eine Fehlfunktion des Immunsystems dar. Eine dritte Theorie vereint beide Positionen und geht davon aus, dass der Boden den Samen verändert. »Frauen mit Endometriose hatten vermutlich normale Gebärmutter Schleimhautzellen, bis die Schäden eintraten

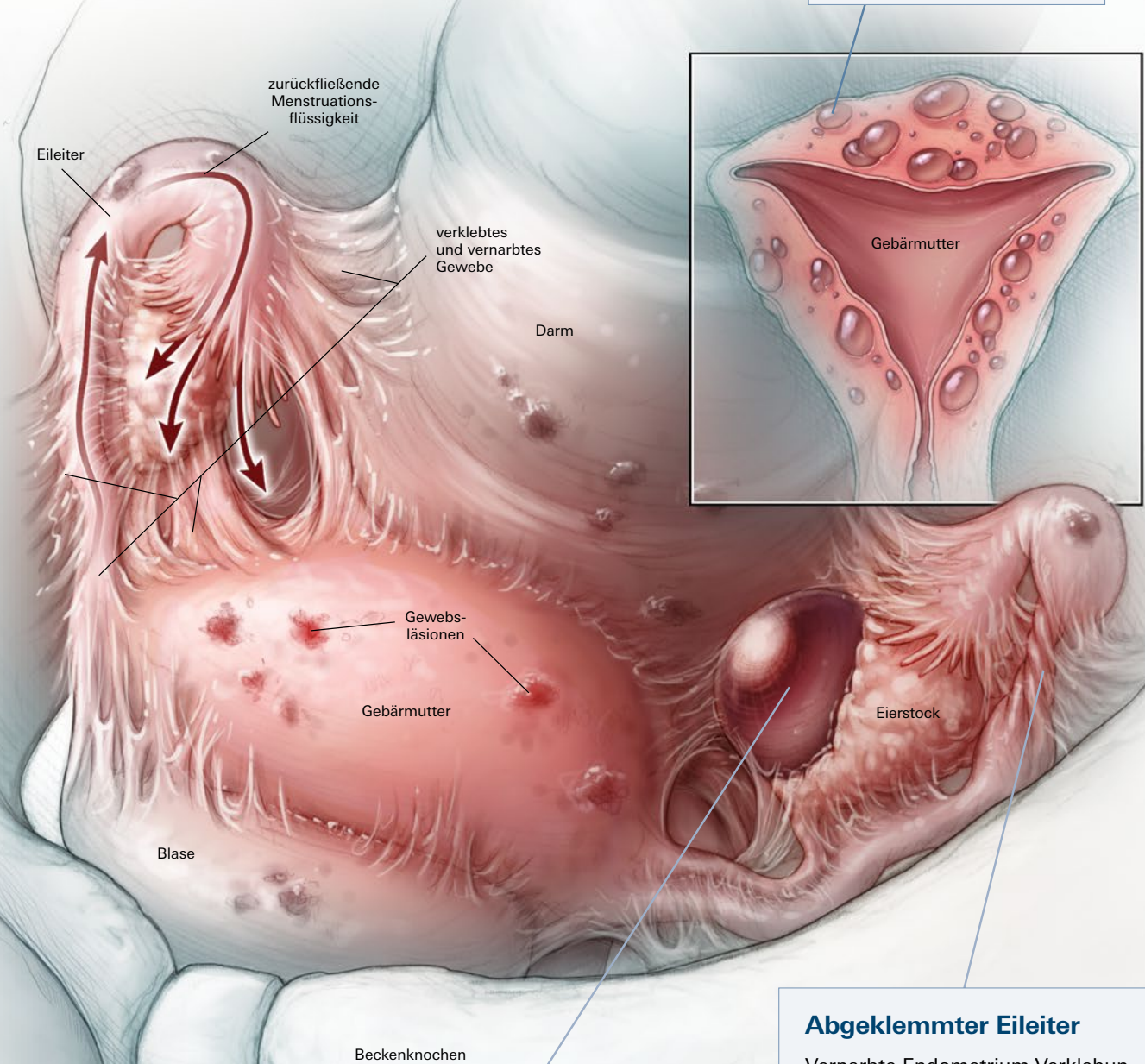
Hinter starken Unterleibsschmerzen kann sich eine Endometriose verbergen. Bei dieser Krankheit vermehren sich Zellen der Gebärmutter Schleimhaut (Endometrium) an anderen Stellen des Körpers. Die Folgen sind Entzündungen und Gewebeschäden.

Eine schmerzhafte Invasion

Nach der Theorie der retrograden Menstruation lösen während der Periode rückwärts durch die Eileiter in die Bauchhöhle fließende Gebärmutter-schleimhautzellen Endometriose aus. Hier wächst das Endometrium weiter; mit dem Zyklus versucht der Körper es abzustößeln. Da aber Blut und Gewebe in der Bauchhöhle gefangen sind, vernarbt und entzündet sich die Stelle.

Adenomyose

Besonders schmerzhaft und zudem schwer diagnostizierbar ist es, wenn Endometriumgewebe in die muskulöse Gebärmutterwand einwächst.



Endometrium

Falsch platziertes Endometriumgewebe kann als Zyste auf dem Eierstock liegen, diesen blockieren und Schmerzen verursachen. Da solche Endometriome hauptsächlich altes Blut enthalten, werden sie auf Grund der dunklen Farbe auch als Teer- oder Schokoladenzysten bezeichnet.

Abgeklemmter Eileiter

Vernarbte Endometrium-Verklebungen können Organe umschließen und einquetschen. Mitunter wird dabei ein Eierstock oder ein Eileiter so eingeklemmt, dass Eizellen nicht mehr passieren können. Die Krankheit führt somit zur Unfruchtbarkeit.

und das Gewebe veränderten«, erklärt Griffith, die in der Immunantwort die eigentliche Triebkraft sieht. Die dadurch ausgelöste Entzündung beeinflusst möglicherweise die Expression von Progesteron- und Östrogenrezeptoren in den Gebärmutter-schleimhautzellen. Die Folge: Die Zellen schütten mehr Östradiol aus und treiben dadurch das Wachstum der Schadstellen an. Dass gesundes Gewebe tatsächlich die Krankheit auslösen kann, zeigten Tierversuche mit Pavianen, denen normale Uterusschleimhautzellen in die Bauchhöhle injiziert worden waren.

Der Gynäkologe Kevin Osteen von der Vanderbilt University in Nashville verdächtigt als mögliche Auslöser Umweltschadstoffe wie das extrem giftige industrielle Nebenprodukt Dioxin oder polychlorierte Biphenyle (PCB) – dioxinähnliche Chemikalien, die in Fleisch, Fisch, Milchprodukten und in unterschiedlichen Mengen auch im Körper jedes Menschen vorkommen. Nach Osteens These beeinträchtigen solche Giftstoffe die physiologischen Vorgänge in der wachsenden Gebärmutter-schleimhaut. Als er und seine Kollegen menschliches Endometrium Dioxin aussetzten, neigte das Gewebe zu Entzündungen und reagierte weniger auf Progesteron. Das Hormon zügelt normalerweise so genannte Matrixmetalloproteinasen – Enzyme, die den allmonatlichen Wiederaufbau der Uterusschleimhaut regulieren. Ohne Progesteron könnte das Gewebe invasiv werden und sich über sein normales Revier hinaus in der Gebärmutter ausbreiten.

Linda Griffith glaubt, dass der Auslöser ihrer Krankheit, was auch immer es gewesen sein mag, schon lange zurückliegt. Retrograde Menstruation könne zwar viele Fälle erklären, aber vermutlich nicht ihren eigenen. Denn bei ihr setzten die quälenden Symptome schon am ersten Tag ihrer ersten Periode ein – lange bevor menstruationsbedingte Schädigungen Zeit gehabt hätten, sich zu entwickeln. Manche Wissenschaftler vertreten die Ansicht, bei solchen Patientinnen habe der Rückfluss von Endometriumzellen vielleicht bereits während einer normalen vaginalen Blutung stattgefunden, die bei weiblichen Säuglingen häufig kurz nach der Geburt auftritt. Beim ungeborenen Mädchen im Mutterleib können ebenfalls zum Endometrium heranreifende Stammzellen außerhalb des Uterus landen; manchmal sogar an weit entfernten Stellen wie Lunge oder Gehirn, wie man bei Föten nach einer Fehlgeburt oder Abtreibung beobachtet hat. »Solche Zellen könnten dort lauern«, erklärt Griffith, »bis das Mädchen in die Pubertät kommt« – als tickende Zeitbomben. Ähnlich wie Krebs offenbart sich Endometriose somit als ein Leiden mit vielen Gesichtern. Oder wie Griffith es formuliert: »Es handelt sich vermutlich nicht um eine Krankheit, sondern um viele.«

Wenn Frauen über Endometriose reden, reden sie über Schmerzen. Sie berichten von Krankheitstagen in der Schule oder im Beruf, von verllorener Zeit und entgangenen Möglichkeiten, vom Rückgang der Lebensfreude. Sie schildern, wie sie ihren Kalender rund um ihre Periode organisieren oder eine Nacht unter Morphium in der Notaufnahme verbringen. Zu den schlimmsten Dingen, die sie zu hören bekommen, gehört die Behauptung, ihre Schmerzen seien »nur in ihrem Kopf«.

Dass Ärzte Leiden von Frauen herunterspielen, hat eine lange Tradition. So stellten US-Forscher 2008 fest, dass Patientinnen mit Bauchweh in der Notaufnahme länger als Männer auf Hilfe warten müssen und mit einer um bis 25 Prozent geringeren Häufigkeit Opiate zur Schmerzlinderung bekommen. Nach einer früheren Studie erhalten männliche Patienten von Krankenschwestern eher Schmerzmedikamente, Frauen dagegen nur Beruhigungsmittel. Und selbst wenn ihnen ein Analgetikum gegeben wird, könnte es gefährlicher oder weniger wirksam sein, weil Arzneimitteltests meist an Männern oder männlichen Mäusen durchgeführt werden.

Selbst nachdem bei Emma endlich die richtige Diagnose gestellt worden war, musste ihr mit 26 Jahren ein Eierstock entfernt werden. Zehn Jahre später brachte sie eine Tochter zur Welt. Heute lebt sie relativ beschwerdefrei, aber noch immer bedauert sie die verlorenen Jahre ohne Diagnose und Therapie. »Wenn ich mein Leben noch einmal führen könnte«, sagt sie, »hätte ich früher auf Antworten gedrängt.« Als ihre Beschwerden begannen, wusste sie noch nicht einmal, dass es so etwas wie Endometriose überhaupt gibt. Und, so ergänzt sie, ihre Ärzte anscheinend auch nicht.

Tabus verhindern offene Gespräche über Schmerzen bei der Menstruation, beim Stuhlgang oder beim Sex

Ein Grund für die Ignoranz von Medizinerinnen und sogar von Betroffenen liegt daran, dass die Qualen während der Menstruation aufflammen, wenn sich Frauen »erwartungsgemäß« nicht wohlfühlen. »Schmerzen sind sehr subjektiv«, erklärt der Gynäkologe Hugh Taylor von der Yale School of Medicine in New Haven. »Als einzig »normal« gelten Krämpfe, und es lässt sich kaum feststellen, wann dieser Schmerz anormal wird.« Gesellschaftliche Tabus, fügt er hinzu, hätten früher offene Gespräche über Beschwerden bei der Menstruation, beim Stuhlgang oder beim Sex verhindert – alles Warnzeichen für Endometriose. »Glücklicherweise sinken hier mittlerweile die Hemmschwellen.« Ärzte wie Patientinnen stören sich zunehmend nicht mehr daran, solche Themen offen anzusprechen und den Ursachen nachzugehen.

Mittlerweile werden auch die Betroffenen aktiv. »Schon seit Jahrzehnten bilden Patientinnenorganisationen Gemeinschaften, die Patientinnen unterstützen, informieren und aufklären«, sagt die Aktivistin Casey Berna. »Die frühere, herablassende Haltung zur Krankenversorgung gibt man immer mehr auf und hört auf die Stimmen der Betroffenen, insbesondere bei komplexen Krankheiten.«

Im April 2018 organisierten Berna und ihre Mitstreiter in Washington eine Protestdemonstration von Patientinnen vor der Zentrale der US-amerikanischen gynäkologisch-geburtshilfflichen Fachgesellschaft ACOG (American College of Obstetricians and Gynecologists). Sie forderten, die ärztlichen Mitglieder der Gesellschaft besser diagnostisch zu schulen und den Patientinnen die neuesten Therapieverfahren zugänglich zu machen, statt etwa unnötige Gebärmutterentfernungen zu verschreiben. »Um es klipp und klar zu sagen«, betont Berna, »wegen der derzeitigen Standards mussten Millionen von Patientinnen jahrzehnte-

lang leiden. Wir fordern das ACOG auf, mit Patientinnenvertretern und Endometrioseexperten zusammenzuarbeiten und alle Mittel zu nutzen, um diese Versorgungskrise in den Griff zu bekommen.«

Fachleute sind sich einig, dass zu viele Mediziner die Krankheit immer noch übersehen. »Kinderärzten und den meisten Hausärzten fehlt das nötige Wissen über Endometriose«, meint Taylor. Fehldiagnosen verschlimmerten oft das Leiden. »Am falschen Ort angesiedeltes Gebärmutter-schleimhautgewebe enthält große Mengen des Enzyms Aromatase, das an den geschädigten Stellen für einen hohen Östrogenspiegel sorgt, was dann wiederum das Gewebswachstum anregt«, erklärt Pamela Stratton von den National Institutes of Health. Zusätzlich werden die Schadstellen resistent gegen Progesteron, das normalerweise Wachstum und Entzündungen drosselt. Der Krankheitsprozess verstärkt sich dadurch: Prostaglandine – schmerzvermittelnde Hormone, die in geschädigtem Gewebe gebildet werden – sowie entzündungsfördernde Zytokine wirken auf die Nervenenden und treiben die Schmerzempfindlichkeit in die Höhe. Im Lauf der Zeit bilden sich Verklebungen und beeinträchtigen die Funktion der Bauchorgane, was weiteres Leid verursacht.

In ständiger Alarmbereitschaft

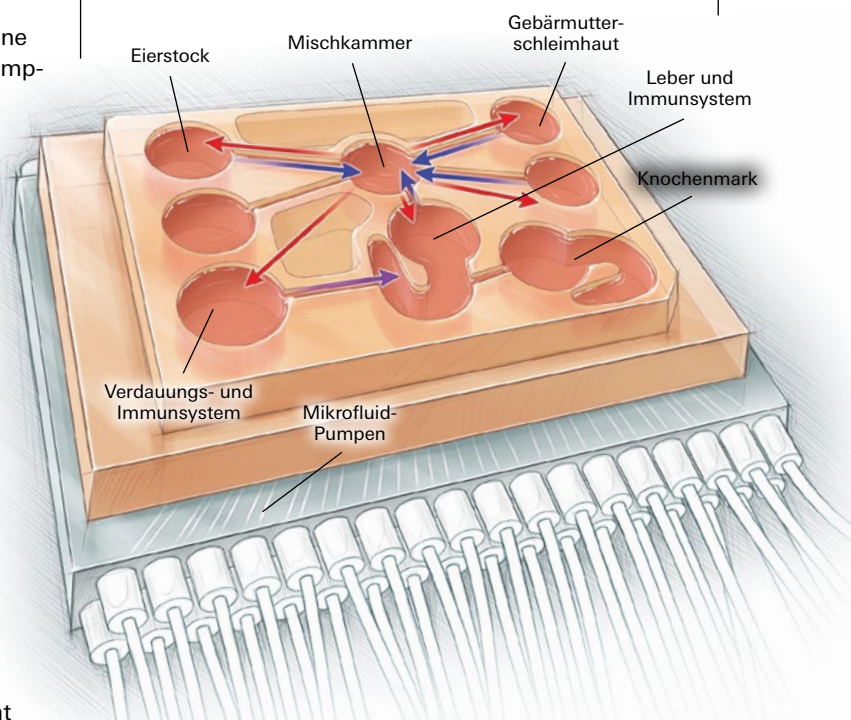
Es gehört zu den seltsamen Aspekten der Endometrioseschmerzen, dass sie kaum im Zusammenhang mit der Schwere oder der Lage der geschädigten Körperstellen stehen. Eine Frau mit nur wenigen Läsionen hat unter Umständen das Gefühl, ihre Organe würden durch den Fleischwolf gedreht, während eine Patientin im schweren Stadium IV mit einem bereits angeschwollenen Bauch vollkommen beschwerdefrei ist. Manche Ärzte übersehen eine Adenomyose, bei der die Muskulatur der Gebärmutter befallen ist. Hier sind die Gewebsschäden auch bei einer Operation kaum zu erkennen, aber die Patientin erduldet Höllenqualen. Viele Frauen leiden selbst dann weiter, wenn die Läsionen sich zurückgebildet haben oder chirurgisch entfernt worden sind.

An diesem Punkt beschränke sich das Problem nicht mehr auf den Bauchraum, erklärt Stratton, jetzt liege eine Störung des Zentralnervensystems vor. In allzu vielen Fällen hat sich das Gehirn so lange auf Schmerzen eingestellt, dass es sie selbst dann nicht mehr ausschalten kann, wenn die Ursache beseitigt wurde. In diesem Zustand der zentralnervösen Sensibilisierung liegen die neuronalen Schaltkreise quasi in ständiger Alarmbereitschaft. Dann löst jeder kleine Reiz, sei es der Eisprung, die Monatsblutung oder Sex, Beschwerden aus und erhält sie aufrecht. Nach Strattons Ansicht dürften hier ebenfalls genetische Faktoren eine Rolle spielen, die Details seien allerdings noch kaum geklärt. Schon bei winzigen Läsionen könnten die Betroffenen unter quälenden, chronischen Schmerzen leiden, was wiederum zur zentralnervösen Sensibilisierung führe, erklärt sie. Fatalerweise hören gerade solche Frauen am häufigsten von ihrem Arzt, es sei alles in Ordnung, denn viele Gynäkologen denken nicht an eine Sensibilisierung. »Sie sind keine Neurologen«, betont

Organe auf einem Chip

Mit Multi-Organ-Chips sollen Medikamente zur Behandlung von Endometriose im Labor getestet werden. Eine solche Plattform enthält lebende Zellen, die zu für die Krankheit relevanten Miniaturorganen gruppiert sind und über eine Mischkammer zur Simulation des Kreislaufs verbunden werden. Die am Massachusetts Institute of Technology konstruierte Plattform »PhysioMimetics« besteht aus Gebärmutter-schleimhaut und Eierstock, die wiederum mit Darm, Leber und Knochenmark verbunden sind, da diese Organe am Medikamentenstoffwechsel und der Immunantwort mitwirken.

DAVID DENERY / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2018



Stratton. »Deshalb berücksichtigen sie nicht, was Neurowissenschaftler mittlerweile über Schmerzen wissen.«

Stratton, die als Gynäkologin und Chirurgen in beiden Welten zu Hause ist, sucht nach Methoden, das Leiden zu bekämpfen und möglicherweise auch die zentralnervöse Sensibilisierung rückgängig zu machen. Wenn ein Medikament über längere Zeit Beschwerden lindern kann, setzt das Zentralnervensystem eventuell die Schmerzschwelle wieder herauf. Möglich wäre das mit Botulinumtoxin, im Volksmund Botox genannt: In den Beckenboden injiziert, lockert es Muskelkrämpfe und beeinflusst vielleicht die Substanzen, die an der Übertragung von Schmerzsignalen beteiligt sind. Nach Strattons Angaben wenden manche Ärzte Botox bereits außerhalb der zugelassenen Indikationen gegen Endometriosebeschwerden an. Ob die Behandlung wirklich hilft, muss sich noch zeigen.

Es geht um viel. Chronische Schmerzen verursachen Schlafprobleme, Ängste, Depression, Reizbarkeit und

Denkstörungen. Mehrere Studien mit bildgebenden Verfahren wiesen Veränderungen der grauen Hirnsubstanz nach, darunter im für das Gedächtnis wichtigen Hippocampus oder im präfrontalen Kortex, der für kognitive Funktionen zuständig ist. In einer kleinen Studie an Endometriosepatientinnen mit chronischen Unterleibsschmerzen beobachtete man eine Schrumpfung des Thalamus, der Inselrinde sowie anderer Hirnareale, die an der Schmerzsteuerung beteiligt sind. Wie Wissenschaftler der Northwestern University in Chicago entdeckten, kann die graue Hirnsubstanz bei chronischem Rückenleiden Jahr für Jahr 1,3 Kubikzentimeter einbüßen – was einer Alterung um 10 bis 20 Jahre entspricht.

Eine Sinfonie aus Hormonen und Immunsystem – allerdings ohne Dirigenten

Sprechen Patientinnen über ihre Ängste, nimmt unerfüllter Kinderwunsch einen hohen Stellenwert ein. Ungefähr die Hälfte aller unfruchtbaren Frauen leidet an Endometriose, wobei sich ihre Schmerzen in einer bitteren Ironie der Natur mitunter wie Wehen anfühlen. Ist der Eileiter blockiert, können die Eizellen unter Umständen nicht aus dem Eierstock in die Gebärmutter wandern; Entzündungen durch Narbenbildung oder chirurgische Eingriffe im Umfeld der Eierstöcke beeinträchtigen zusätzlich Qualität und Menge der Eifollikel. Entzündungsfördernde Zytokine und andere Substanzen in der Bauchhöhlenflüssigkeit vermindern die Beweglichkeit der Spermazellen in den Eileitern und schädigen sowohl Eizellen als auch Embryonen.

Hormonelle Probleme können ebenfalls auftreten. Die Befruchtung funktioniert wie eine Sinfonie mit einem Orchester aus Hormonen und dem Immunsystem – bei Endometriose hat der Dirigent den Saal verlassen. Normalerweise sinkt nach dem Eisprung die Konzentration der Östrogenrezeptoren in der Gebärmutterwand, um sie auf die Einnistung vorzubereiten. Der Progesteronspiegel steigt dagegen an und gibt damit der Gebärmutterhaut das Signal, sich auf die Aufnahme und Ernährung der befruchteten Eizelle vorzubereiten. Das Hormon stellt die Gebärmutter ruhig und unterbindet Kontraktionen. Bei Endometriose jedoch spricht die Gebärmutterhaut nicht auf Progesteron an, und sein Gegenspieler Östradiol behält die Oberhand – einer von mehreren Faktoren, die ein wenig freundliches Umfeld für den frühen Embryo schaffen. Und selbst wenn es zur Einnistung kommt, erhöht die Progesteronresistenz das Risiko für eine Fehl- oder Frühgeburt.

Noch komplizierter wird das Ganze durch die Bakteriengesellschaft in der Gebärmutterhaut. Studien zufolge dominieren *Lactobacillus*-Bakterien im Uterus und wirken sowohl bei der Einnistung als auch bei der Ernährung des wachsenden Embryos mit. Wie Forscher spekulieren, könnte die durch Endometriose verursachte chronische Entzündung diese Bakterien abtöten und so in der Gebärmutter ein mikrobiologisches Klima schaffen, das die Entzündung aufrechterhält und zur Unfruchtbarkeit führt. Hierzu passen die vorläufigen Ergebnisse, die eine spanische Arbeitsgruppe 2016 veröffentlichte: Wenn

andere Mikroorganismen statt *Lactobacillus* in der Gebärmutterhaut vorherrschen, kommt es dreimal seltener zur Einnistung, und die Zahl der Fehlgeburten schießt in die Höhe. Auch wenn die Ursachen hierfür noch unklar sind, regen solche Studien weitere Untersuchungen an, die Rolle des Gebärmutterhaut-Mikrobioms bei Endometriose genauer zu erforschen. Manche Ärzte werden vielleicht in Zukunft Bakterienkulturen von der Gebärmutterhaut anlegen, bevor sie Unfruchtbarkeit behandeln.

Es gibt aber auch Erfolgsgeschichten. Je nach Krankheitsstadium werden 43 bis 55 Prozent aller Endometriosepatientinnen nach einer In-vitro-Fertilisation schwanger, und der Anteil lebend geborener Kinder liegt dann ähnlich hoch wie bei gesunden Frauen. Unter den hormonellen Bedingungen der Schwangerschaft lassen die Symptome in der Regel nach. Stillen mindert ebenfalls das Endometrioserisiko, berichten Wissenschaftler aus Boston, die 2017 einen Datenbestand von mehr als 70 000 Frauen gesichtet hatten: Alle drei Monate sank bei ausschließlich stillenden Frauen das Erkrankungsrisiko um 14 Prozent. Ob Hormone und immunologische Faktoren, die beim Stillen eine Rolle spielen, Endometriosesymptome lindern können, bleibt offen.

Wenn Ärzte über Endometriose reden, nennen sie stets das Siebenjahresproblem: Ein so langer Zeitraum vergeht im Schnitt zwischen dem Auftreten erster Beschwerden und der Diagnose – dann sind vielfach schon große Schäden eingetreten. Derzeit erfordert die Diagnose eine Bauchspiegelung (Laparoskopie). Viel einfacher wäre es, ließe sich die Krankheit über schlichte Blut-, Speichel- oder Urintests dingfest machen; hierfür braucht man allerdings geeignete Marker.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



KEEWEEBOY / GETTY IMAGES / ISTOCK

Seit einigen Jahren konzentrieren sich Wissenschaftler in mehreren Instituten auf microRNA (miRNA) – kurze, nicht codierende RNA-Sequenzen, welche die Genexpression regulieren. 2016 identifizierte Hugh Taylors Arbeitsgruppe drei miRNAs, die bei Endometriosepatientinnen im Vergleich zu Kontrollpersonen in größerer Menge vorkommen. Taylors Unternehmen DotLab will mit Hilfe dieser miRNAs einen ersten diagnostischen Speicheltest für Endometriose entwickeln, der nach seinen Angaben mit einer Genauigkeit von weit über 90 Prozent funktionieren wird. Damit könnten Frauen früher eine Therapie erhalten, und es ließe sich leichter feststellen, ob ein verschriebenes Medikament auch wirkt. Schließlich stellt eine Diagnose allein noch keine Gewähr für eine Symptomlinderung dar.

Manche Arzneien helfen am Anfang, verlieren aber dann ihre Wirksamkeit. Andere lösen Symptome aus, die denen der Wechseljahre ähneln.

Wenn es nach der Gynäkologin Julie Kim von der Northwestern University in Chicago geht, sollte in Zukunft die Diagnose mit einer Hautbiopsie beginnen: Zellen aus einem winzigen Stück Haut, das vom Oberschenkel oder von der Hüfte entnommen wird, ließen sich gentechnisch in ihrer Entwicklung zurückdrehen – als induzierte pluripotente Stammzellen (iPS-Zellen) können sie dann zu jeder anderen Körperzelle heranwachsen, seien es Leber-, Nieren- oder Gebärmutter-schleimhautzellen. Jeder derartige Zelltyp kann als Keim für ein »Mikroorgan« auf einem elektrischen Schaltkreis von der Größe eines Tabletcomputers dienen, der den gesamten Organismus repräsentiert – gewissermaßen als medizinischer Avatar.

Mehrere solcher Avatare mit einem Multi-Organ-Chip gibt es bereits (siehe »Organe auf einem Chip«, S. 42). Die Arbeitsgruppe von Teresa Woodruff von der Northwestern University, zu der auch Kim gehört, nannte ihr Gerät EVATAR: ein weibliches Fortpflanzungssystem im Miniaturformat, einschließlich Mikroeierstöcken, Eileitern, Gebärmutter, Gebärmutterhals und Leber. Wie bei anderen Patientenavatar-Systemen liegen die »Organe« von EVATAR in münzgroßen Gefäßen, die auf einer mit einem Computer verbundenen Platte stehen. Dazwischen fließt durch Mikrokanäle künstliches Blut, das Hormone, Nährstoffe sowie Wachstums- und Immunfaktoren transportiert. Wie sein biologisches Vorbild hat der EVATAR einen monatlichen Zyklus, blutet jedoch nicht.

Maßgeschneiderte Medikamententests und Krankheitsmodelle im Computer

Da jedes Mikroorgan auf der EVATAR-Plattform den einzigartigen genetischen Bauplan einer bestimmten Patientin enthält, ließe sich feststellen, welche Medikamente ihr mit der größten Wahrscheinlichkeit helfen werden. Möglich wäre auch, experimentelle Wirkstoffe zu testen, welche die Gewebsschäden der Gebärmutter-schleimhaut vermindern sollen, erklärt Kim. Während des Menstruationszyklus könnten die Wissenschaftler die Daten aus allen Organen sammeln und analysieren, um so auf Zellebene festzustellen, ob das Medikament wirkt und ungefährlich ist. Mit solchen Experimenten ließen sich Tests an Versuchstieren und Menschen vermeiden, deren Übertragbarkeit auf betroffene Frauen unklar ist; gleichzeitig eröffnet sich der Weg zu einer personalisierten Medizin.

Eine Machbarkeitsstudie mit dem EVATAR haben die Forscher der Northwestern University erfolgreich abgeschlossen; nach Kims Angaben kann es allerdings etwa fünf Jahre dauern, bis eine Plattform für Endometriose entwickelt ist. Bis zur Anwendung bei einzelnen Patientinnen dürfte entsprechend mehr Zeit vergehen.

Eine maßgeschneiderte Medikamentenerprobung per Patientenavatar bleibt laut Linda Griffith wohl noch unerschwinglich, dennoch spielen Multi-Organ-Chips bei der weiteren Erforschung der Endometriose eine wichtige Rolle. Statt eine Plattform für einzelne Patientinnen anzuwenden, hält Griffith es für sinnvoller, Endometriosepatienten

ähnlich wie bei Brustkrebs anhand molekularer Marker in Kategorien einteilen, um dann für jeden einzelnen Typ passende Wirkstoffe zu entwickeln. »Jede Patientin ist anders«, betont sie, »aber wir glauben, dass es Gruppen mit gemeinsamen Merkmalen gibt.«

Um solche Gruppen aufzuspüren, bräuchte man zunächst Krankheitsmodelle im Computer sowie einige hypothetische Klassifikationsschemata, erläutert Griffith. Danach müsste man mehrere hundert Patientinnen aus zahlreichen Kliniken rekrutieren, um die Modelle an ihnen zu erproben. Griffith prophezeit, dass sich dabei drei bis fünf Gruppen mit unterschiedlichen Fehlfunktionen herauskristallisieren werden, die jeweils charakteristische molekulare Kennzeichen tragen.

Auch wenn Multi-Organ-Chips und andere Hilfsmittel viel versprechende Möglichkeiten eröffnen, bleibt für die Mediziner-gemeinde noch ein langer Weg, bis man Endometriose wirksam bekämpfen kann. Die Finanzierung der Erforschung dieser Krankheit steht nach wie vor in keinem Verhältnis zu ihren gesellschaftlichen Kosten: Laut einer 2011 erschienenen Studie der World Endometriosis Research Foundation, in der mehr als 1400 Frauen in zehn Ländern befragt worden sind, sinkt durch die Krankheit die Produktivität der betroffenen Frauen am Arbeitsplatz um nahezu elf Stunden pro Woche, also um mehr als ein Viertel bei einer 40-Stunden-Woche. Allein in den Vereinigten Staaten gehen damit der Gesellschaft durch verlorene Arbeitsproduktivität und unmittelbare Kosten für die medizinische Versorgung jährlich 62 Milliarden Dollar verloren. Andererseits wurde 2018 in den USA nach Angaben der National Institutes of Health für die Diabetesforschung nahezu eine Milliarde Dollar ausgegeben; für die Erforschung von Endometriose, von der ungefähr der gleiche Anteil der Frauen betroffen ist, standen jedoch nur sieben Millionen Dollar zur Verfügung.

Glücklicherweise, so Griffith, ziehe das Forschungsgebiet begabten Nachwuchs an, sei die Arbeit doch »wissenschaftlich faszinierend« und gesellschaftlich relevant. Schließlich gibt es außer einem chirurgischen Eingriff immer noch keine Heilung. Helfen würde, wie Emma meint, »das subjektive Fehlen von Schmerzen«. Lassen die chronischen Beschwerden nach, heilt auch der Geist. Die graue Hirnsubstanz kann nachwachsen, und das tut sie. Doch wie eine Schlingpflanze lässt sich Endometriose kaum zurückdrängen – dazu bedarf es der gemeinsamen Anstrengungen von Wissenschaftlern und Ärzten, aber auch des finanziellen Engagements einer Gesellschaft, die diese Krankheit endlich ernst nimmt. ◀

QUELLEN

Cosar, E. et al.: Serum MicroRNAs as Diagnostic Markers of Endometriosis: A Comprehensive Array-Based Analysis. In: *Fertility and Sterility* 106, S. 402–409, 2016

Moreno, I. et al.: Evidence that the Endometrial Microbiota Has an Effect on Implantation Success or Failure. In: *American Journal of Obstetrics & Gynecology* 215, S. 684–703, 2016

Xiao, S. et al.: A Microfluidic Culture Model of the Human Reproductive Tract and 28-Day Menstrual Cycle. In: *Nature Communications* 8, 14584, 2017

Andere Sichtweisen.

Die Strategie des Sebastian Kurz im FOCUS.

POLITIK

Was ist heute konservativ, Herr Bundeskanzler?

Er ist Angela Merkel in der Flüchtlingskrise scharf angegangen, hat die Balkanroute fast im Alleingang geschlossen und wurde als jüngster Außenminister der Welt mit 31 Jahren zum Kanzler Österreichs angelobt. Lernen Sie hier auch den Menschen **Sebastian Kurz** kennen

EIN INTERVIEW VON **JÖRG HARLAN ROHLEDER, WALTER MAYER** UND **ROBERT SCHNEIDER**
FOTOS VON **INGO PERTRAMER**



Außenperspektive
Staatssekretär mit 24, Außenminister mit 27, Kanzler mit 31: Wenn Sebastian Kurz aus dem Fenster des Büros schaut, sieht er den Minoritenplatz und die Bruno-Kreisky-Gasse



Innenperspektive
Er hat aus der ÖVP eine Bewegung gemacht – und ein Land gewonnen.
Im Bild: Sebastian Kurz während des FOCUS-Gesprächs

FOCUS 20/2018

Menschen im

FOCUS

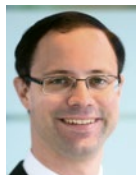


300 Nanometer

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EISENFORSCHUNG GMBH

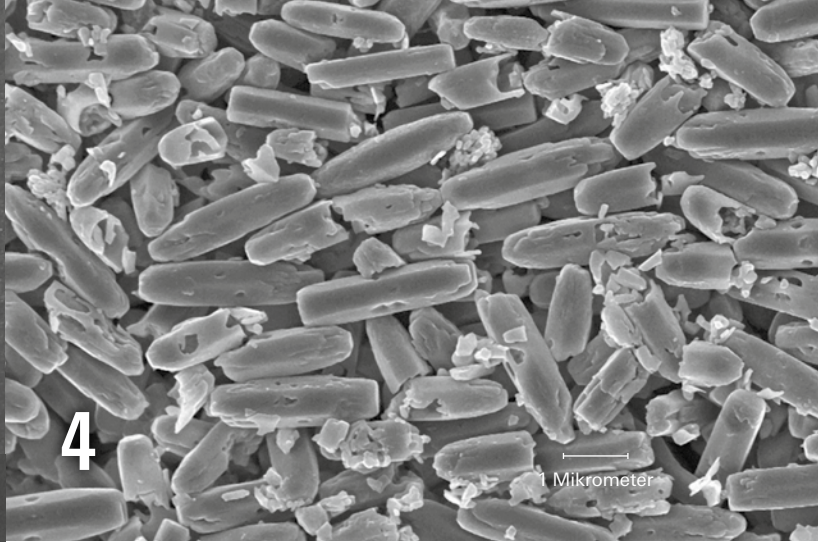
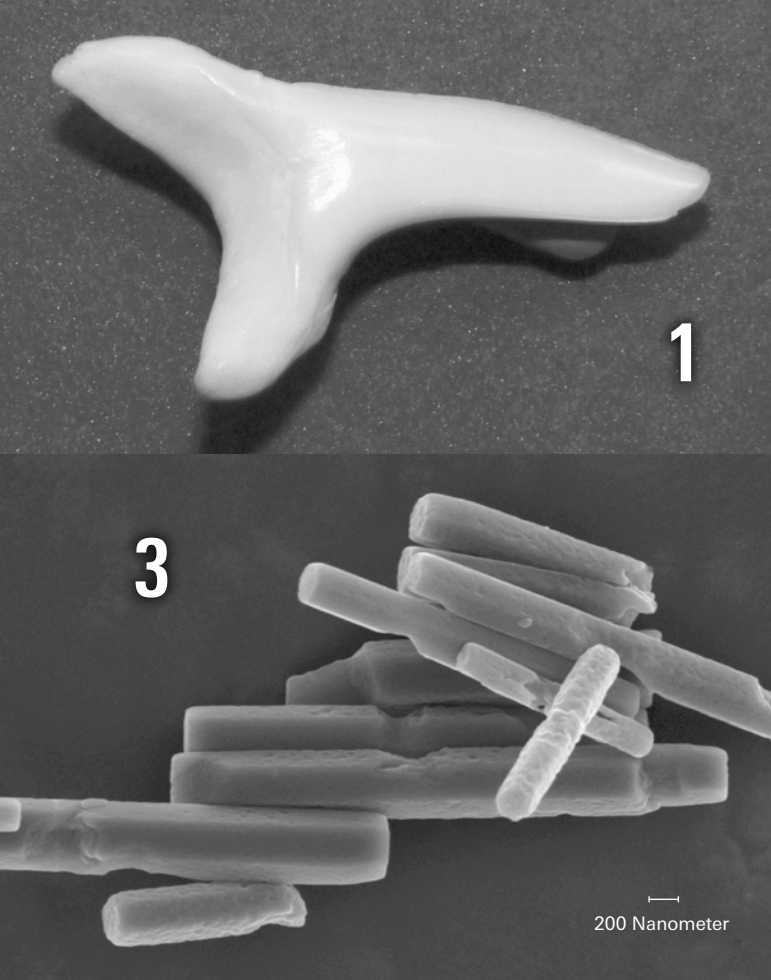
BIOMIMETIK DIE NATUR ALS VORBILD

Zahnmediziner versuchen, natürliche Materialien und Prozesse zu imitieren. Sie möchten damit Zahn- und Zahnfleischerkrankungen sowohl vorbeugen als auch behandeln.



Helge-Otto Fabritius (links) ist promovierter Biologe und leitet die Arbeitsgruppe »Biologische Verbundwerkstoffe« am Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH in Düsseldorf. **Frederic Meyer** (Mitte), promovierter Mikrobiologe und Epidemiologe, und **Joachim Enax**, promovierter Chemiker, arbeiten in der Forschung der Firma Dr. Kurt Wolff GmbH & Co. KG in Bielefeld.

» spektrum.de/artikel/1603748



Nach dem Vorbild von Haizähnen (1) entwickeln Forscher einen biomimetischen Zahnersatz. Haizähne bestehen zwar aus einem anderen Material als menschliche Zähne, aber ebenso wie diese aus kleinen Kristalliten, die in Bündeln gruppiert sind (2). Ähnliche Kristallite lassen sich heute künstlich herstellen (3). Ordnet man sie passend an und gibt eine Klebesubstanz hinzu (4), entsteht ein Stoff, der dem des Originalzahns ähnelt und sich beispielsweise zu Inlays formen lässt.

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EISENFORSCHUNG GMBH

► Kaum jemand freut sich auf den Besuch beim Zahnarzt, denn nur zu oft verlässt man die Praxis mit einer Füllung mehr. Die meisten leiden irgendwann im Leben unter Zahn- und/oder Zahnfleischproblemen, oft betrifft es bereits Kinder. Laut der Fünften Deutschen Mundgesundheitsstudie haben Erwachsene hier zu Lande, je nach Altersgruppe, durchschnittlich an jedem dritten bis mehr als jedem zweiten Zahn kariesbedingte Schäden. Zudem leidet mehr als jede(r) zweite Erwachsene unter Zahnfleischproblemen. Das ist auch deshalb bedeutsam, weil die Mundgesundheit einen großen Einfluss auf den restlichen Körper hat; unter anderem werden Zusammenhänge von Zahnfleischentzündungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen diskutiert. Im Jahr 2010 lagen die weltweiten Gesamtkosten, die durch Zahn- und Zahnfleischerkrankungen entstanden, bei zirka 440 Milliarden US-Dollar. Daran haben moderne Ernährungsgewohnheiten, insbesondere der ausgeprägte Zuckerkonsum, einen großen Anteil. Um die Zahnpflege und Mundhygiene zu verbessern, suchen Wissenschaftler ständig nach neuen, immer leistungsfähigeren Konzepten.

Zunehmend wichtig wird dabei die Biomimetik. So nennt man das Imitieren von natürlichen Materialien, Strukturen oder Abläufen, die während der Evolution entstanden sind. Beispiele dafür sind der Klettverschluss, der dem Haftmechanismus von Klettfrüchten nachempfunden ist, und selbstreinigende Oberflächen nach dem Vorbild der Lotospflanze.

Forscher weltweit, darunter auch wir, suchen nach biomimetischen Methoden, um Zahn- und Zahnfleisch-

erkrankungen vorzubeugen. Der Zahnschmelz ist die äußerste Schicht eines Zahns und die härteste Substanz im gesamten menschlichen Organismus. Dafür sorgt seine Struktur aus stäbchenförmigen, mikroskopisch kleinen Kristallen – so genannten Kristalliten –, die eng aneinander gefügt sind. Sie bestehen hauptsächlich aus dem Mineral Hydroxylapatit, das aus Kalzium und Phosphat besteht. Die Hydroxylapatit-Kristallite sind zu langen, säulenähnlichen Strukturen zusammengefasst, den »Prismen«, die parallel zueinander und senkrecht zur Zahnoberfläche verlaufen. Elektronenmikroskopische Abbildungen der

AUF EINEN BLICK MIT BISS BIS INS ALTER

- 1** Zahn- und Zahnfleischerkrankungen sind bedeutende medizinische Probleme. Sie verursachen weltweit jährliche Kosten von rund 440 Milliarden Dollar.
- 2** Um die Zahnmedizin zu verbessern, setzen Forscher zunehmend auf biomimetische Verfahren, die natürliche Prozesse und Materialien nachahmen.
- 3** Das Mineral Hydroxylapatit ist der Hauptbestandteil von Zähnen. Künstlich hergestellt, lassen sich daraus Mundpflegeprodukte oder künftig womöglich sogar Zahnersatz entwickeln.

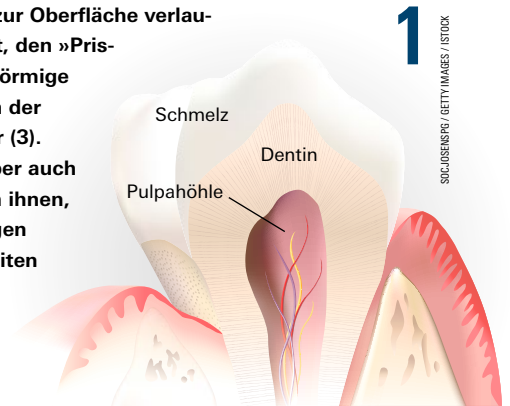
Zahnschmelzoberfläche zeigen die kreisförmigen Querschnitte der Prismen (siehe Bild unten).

Dieses Gefüge bietet den Vorteil, dass Risse im Zahnschmelz früh gestoppt werden, weil die Grenzen der Kristallite ihre Ausbreitung verhindern. Daher ist ein intakter Zahn trotz seiner Härte nicht so spröde und zerbrechlich wie beispielsweise Keramik.

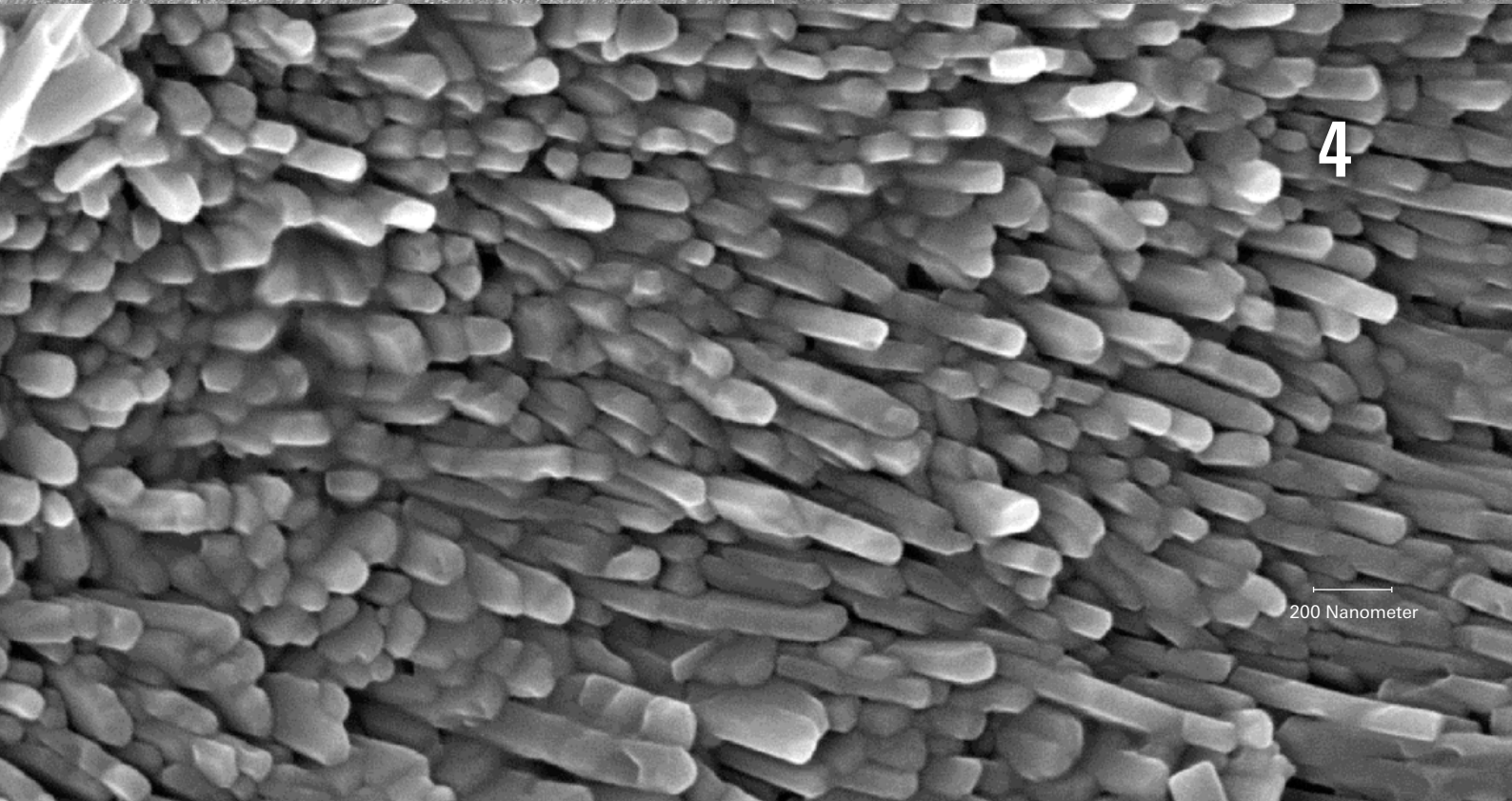
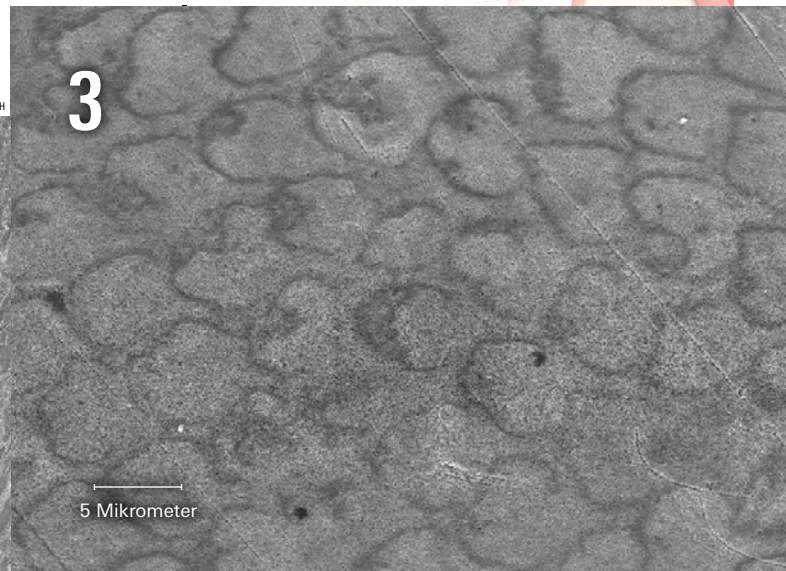
Die Zusammensetzung des Zahnschmelzes aus strukturell übergeordneten Prismen und untergeordneten Kristalliten nennt man eine hierarchische Struktur. Ein solcher Aufbau findet sich in vielen weiteren biologischen Materialien, etwa in Knochen oder in Muschelschalen. Und wie der Zahnschmelz bestehen auch unsere Knochen zu einem großen Teil aus Hydroxylapatit. Das verbreitete Vorkommen dieses Minerals in unserem Körper macht es zu einem medizinisch unbedenklichen, gut verträglichen Stoff, den Mediziner, Medizintechniker und andere zu diversen Zwecken einsetzen (siehe Kasten auf S. 49).

Da der Organismus Zähne, nachdem sie durch das Zahnfleisch gestoßen sind, nicht mehr reparieren kann –

Der Querschnitt durch einen menschlichen Zahn (1) lässt erkennen, wie der außenliegende Zahnschmelz das Zahnbein (Dentin) bedeckt. Die innen liegende Pulpahöhle beherbergt den Zahnnerv. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen, dass der Zahnschmelz aus parallelen, senkrecht zur Oberfläche verlaufenden Säulen besteht, den »Prismen« (2). Deren kreisförmige Querschnitte treten an der Zahnoberfläche hervor (3). Die Prismen selbst, aber auch das Material zwischen ihnen, setzen sich aus winzigen Hydroxylapatit-Kristalliten zusammen (4).



SOCCIO/SHUTTER / ISTOCK



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EISENFORSCHUNG GMBH

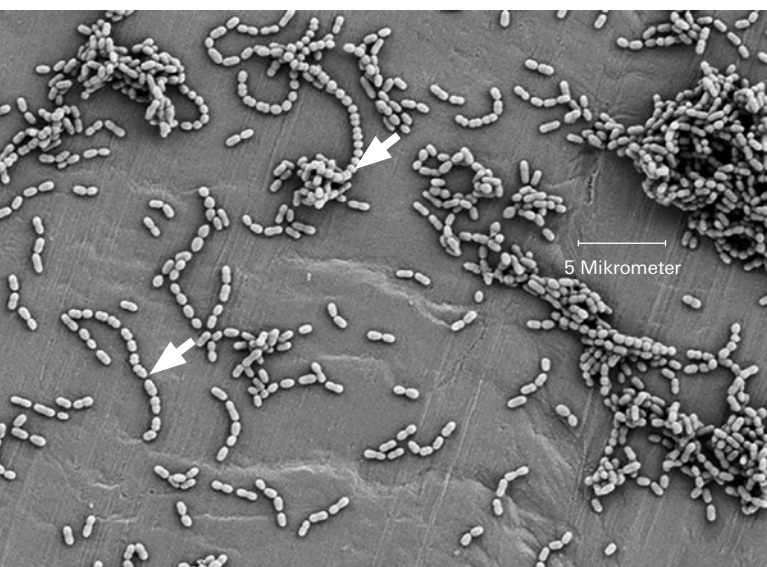
im Gegensatz etwa zu Knochen –, hat sich der Zahnschmelz evolutionär so entwickelt, dass er im Prinzip ein Leben lang hält. Aber trotz seiner hervorragenden Materialeigenschaften ist er angreifbar. Insbesondere Säuren in der Nahrung können den Zähnen zusetzen und deren Bestandteile Kalzium und Phosphat herauslösen. Nach dem Genuss von säurehaltigen Getränken, beispielsweise Limonaden oder Energydrinks, spürt man mit der Zunge daher häufig ein raues Gefühl auf der Zahnoberfläche.

Säureangriff auf den Zahnschmelz

Stammesgeschichtlich ist das kein neues Problem, schließlich können auch natürliche Nahrungsmittel einen hohen Säureanteil haben, darunter etliche Obstsorten. Die Evolution hat deshalb kompensierende Mechanismen hervorgebracht. Unser Speichel enthält Kalzium- und Phosphationen in gelöster Form, die sich an beschädigten Zahnschmelz anlagern und sich dort zu neuem Hydroxylapatit verbinden – die »Remineralisation«. Hält der Säureangriff jedoch für längere Zeit an, ist irgendwann der Punkt erreicht, an dem die natürliche Remineralisation aus dem Speichel nicht mehr ausreicht. Genau das passiert bei Karies: Bei unzureichender Entfernung von Zahnbelägen über Monate hinweg siedeln sich darin dauerhaft Bakterien an, die Zucker aus der Nahrung zu Säuren verstoffwechseln. Deren Einwirkung kann den Zahnschmelz bleibend schädigen, bis hin zu Löchern, die der Zahnarzt ausbohren und mit einer Füllung verschließen muss.

Einmal zerstörten Zahnschmelz kann der Organismus nicht wiederherstellen. Um es gar nicht erst so weit kommen zu lassen, ist eine gewissenhafte Mundhygiene sehr wichtig. Dabei spielen seit einiger Zeit auch biomimetische Ansätze eine Rolle: Forscher verschiedener Arbeitsgruppen haben es geschafft, Kristallite aus Hydroxylapatit künstlich nachzubilden und daraus Zahnpflegelösungen zu entwickeln. Dafür war es zunächst notwendig, Struktur und Zusammensetzung des natürlichen Zahnschmelzes mit modernen Analysemethoden zu untersuchen, etwa der Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenpulverdiffrakto-

***Streptococcus mutans* sind typische Karies verursachende Bakterien. Sie bilden Biofilme auf Zähnen und ordnen sich häufig in Ketten (Pfeile) an, wie diese rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt.**



Ein universelles Mineral

Hydroxylapatit, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$, setzt sich aus Kalzium und Phosphat zusammen, bildet die Grundlage der Hartschicht von Wirbeltieren und kommt auch im menschlichen Organismus in großen Mengen vor. Je höher der Anteil an Hydroxylapatit, desto härter ist das entsprechende Gewebe. Zahnschmelz als äußere Schicht des Zahns besteht zu etwa 97 Prozent daraus, Dentin hingegen (die innere Zahnschicht) zu zirka 70 Prozent, Knochen wiederum zu rund 65 Prozent.

Mediziner, Medizintechniker und andere setzen das Mineral zu verschiedenen Zwecken ein, etwa als Ersatzmaterial bei Knochenschäden oder als Beschichtung von Implantaten, damit der Organismus diese nicht abstößt. Auch als Träger von Arzneistoffen hat sich Hydroxylapatit bewährt, ebenso wie in der Zahnpflege zum Kariesschutz, zur Schmerzprophylaxe bei empfindlichen Zähnen sowie zum Verhindern von bakteriellen Anlagerungen.

metrie. Basierend auf den Erkenntnissen entwickelten die Wissenschaftler spezielle Verfahren, um die natürlichen Kristallite möglichst genau nachzuahmen und in großen Mengen zu synthetisieren. Dies gelingt durch die Wahl geeigneter Reaktionsbedingungen für die Ausgangsstoffe Kalzium und Phosphat und mit Hilfe spezieller Zusatzstoffe, so genannter Additive. Die dabei gewonnenen biomimetischen Hydroxylapatit-Kristallite lagern sich fest an die Zahnschmelzoberfläche an, wie Studien unter Laborbedingungen und Untersuchungen an Probanden gezeigt haben. Dabei weist dieser Wirkstoff eine sehr gute Bioverträglichkeit auf und ist deshalb in der Anwendungsdosierung kaum beschränkt.

Sowohl Karies als auch Zahnfleischprobleme werden von Bakterien verursacht. Deshalb gilt es zu verhindern, dass schädliche Mikroben die Mundhöhle besiedeln. Zusätzlich zum mechanischen Entfernen von Zahnbelägen mit Bürsten, Pasten und Zahnseide lassen sich unerwünschte Mikroben auch mit antibakteriellen Wirkstoffen abtöten. Dies geschieht im Organismus ständig, da der Speichel antimikrobielle Bestandteile enthält, darunter bestimmte Enzyme. Allerdings wirken künstliche Substanzen (beispielsweise Chlorhexidin) in Zahnpflegeprodukten hier weitaus intensiver. Da diese aber auch nützliche Bakterien eliminieren können, sollten sie nicht dauerhaft eingesetzt werden. Besser wäre es, potenziell schädliche Mikroben präventiv daran zu hindern, sich an den Zahnschmelz anzulagern.

Hier haben biomimetische Strategien erste Erfolge gezeigt. Zahnmediziner um Christian Hannig von der TU Dresden haben 2017 gezeigt, dass Mundspülungen mit Hydroxylapatit-Partikeln die initiale Anhaftung von Bakte-

Wissen verschenken und Freude bereiten –

mit einem Geschenk-Abonnement!



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie

Print 12 Ausgaben, € 89,-
Digital 12 Ausgaben, € 60,-
Print + Digital € 95,-



Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin

Print 12 Ausgaben, € 85,20
Digital 12 Ausgaben, € 60,-
Print + Digital € 91,20



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung

Print 12 Ausgaben, € 89,-
Digital 12 Ausgaben, € 60,-
Print + Digital € 95,-



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung

Print 4 Ausgaben, € 29,60
Digital 4 Ausgaben, € 21,-
Print + Digital € 33,60



Spannende Themen aus der Welt der Kulturwissenschaften

Print 4 Ausgaben, € 29,60
Digital 4 Ausgaben, € 21,-
Print + Digital € 33,60



Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences

Print 4 Ausgaben, € 29,60
Digital 4 Ausgaben, € 21,-
Print + Digital € 33,60



Das Magazin für den modernen selbstbestimmten Menschen

Print 6 Ausgaben, € 31,20
Digital 6 Ausgaben, € 24,60
Print + Digital € 37,20

Ein ganzes Jahr Freude

... und weitere gute Gründe, ein Abo zu verschenken

1. Auch Sie profitieren von einer Bestellung, denn Sie erhalten dafür ein Geschenk zur Wahl.
2. Bestellen Sie für sich oder einen lieben Menschen die passende Lektüre – gedruckt oder digital.
3. Pünktlich zu dem von Ihnen gewünschten Termin verschicken wir die erste Ausgabe zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.



Samsonite
Regen-
schirm



Würfel-
spiel



Baum-
spende



Astro-
kalender

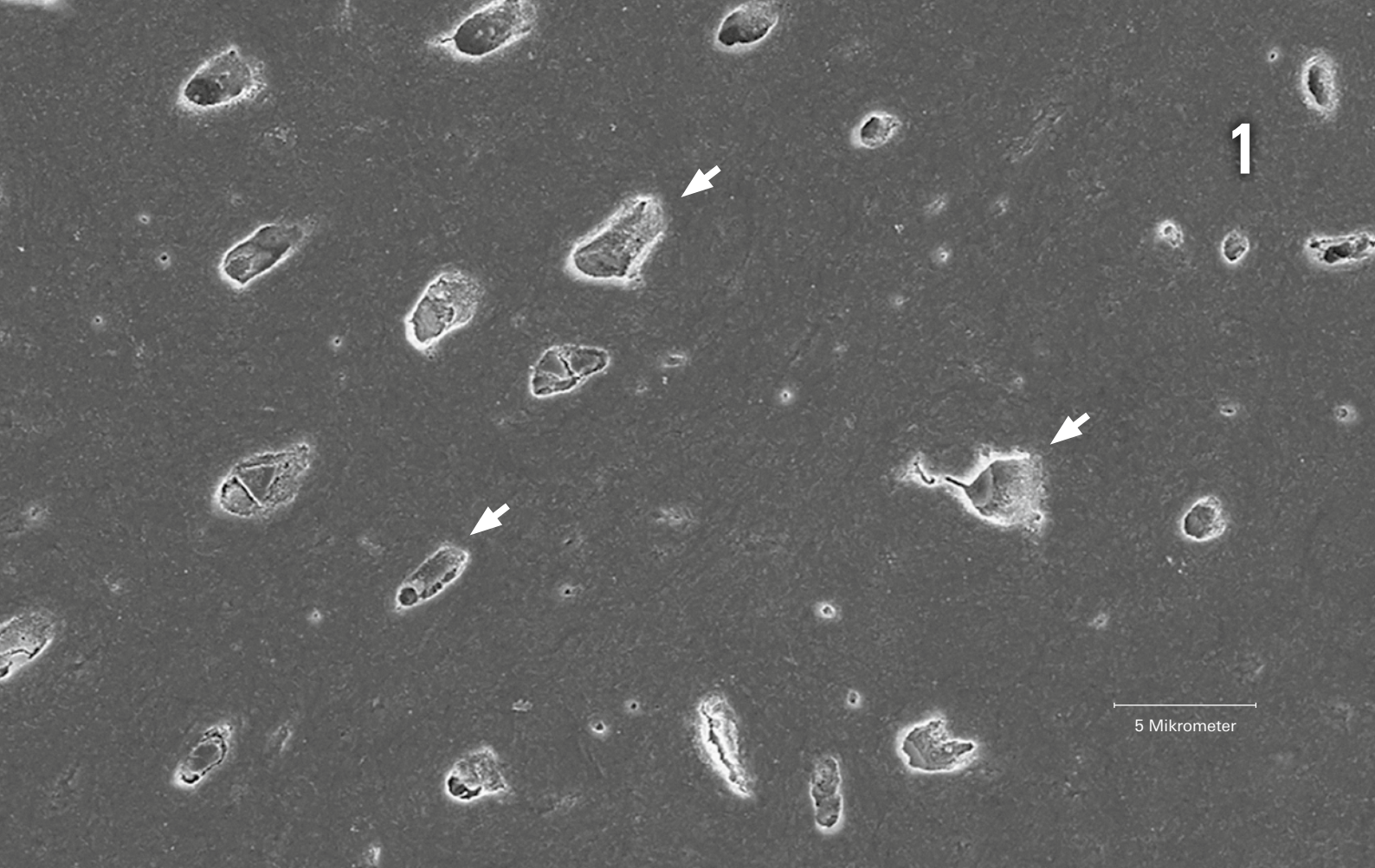


Buch

Jetzt bestellen:

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

www.spektrum.de/geschenk



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EISENFORSCHUNG GMBH

rien an den Zahnschmelz minimieren können. So lässt sich Zahn- und Zahnfleischproblemen vorbeugen, ohne das Mikrobiom der Mundhöhle generell in Mitleidenschaft zu ziehen. Forscher um Benjamin Ehmke vom Universitätsklinikum Münster sowie um Ulrich Schlagenhauf vom Universitätsklinikum Würzburg haben in klinischen Studien von 2016 beziehungsweise 2018 nachgewiesen, dass Zahnpasten mit Hydroxylapatit sowohl die Zahnfleischgesundheit verbessern als auch vor Karies schützen.

Schmerzattacke nach dem Biss in die Eiskugel

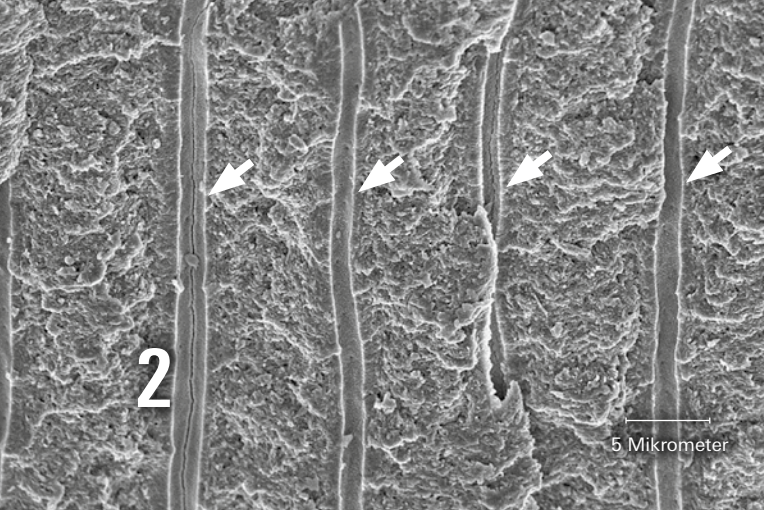
Auch bei schmerzempfindlichen Zähnen haben sich biomimetische Ansätze bewährt. Die stechende Pein, wenn man ein kaltes Getränk zu sich nimmt oder ein Eis isst, kennt wohl jede(r). Sie rührt meist daher, dass das Zahnbein (Dentin) frei liegt. Normalerweise ist es im Bereich der Zahnkrone vollständig vom Zahnschmelz umgeben. Zahnfleischerkrankungen können aber dazu führen, dass sich das Zahnfleisch zurückzieht und das Dentin im Wurzelbereich entblößt. Der Weg zum Zahnnerve ist dann offen, weil nun feine Kanäle – so genannte Dentintubuli – zugänglich werden, die durchs Zahnbein hindurch in Richtung zum Nerv verlaufen.

Durch den Verschluss dieser Kanälchen lässt sich die Schmerzüberempfindlichkeit abstellen. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen haben bestätigt, dass Hydroxylapatit-Partikel sich auf Grund ihrer Größe ideal eignen, um Dentintubuli zu versiegeln. Rolf-Werner Hüttemann und Helga Dönges hatten dies bereits 1987 in einer

klinischen Studie an der Universität Gießen nachgewiesen: Bei 90 Prozent der behandelten Probanden ließ wenige Tage nach der Behandlung die Schmerzempfindlichkeit deutlich nach, bei jedem Zweiten verschwanden die Beschwerden während der Studie sogar ganz.

Eine weitere interessante Stoffgruppe im Bereich der Biomimetik sind Probiotika, also lebensfähige Mikroorganismen, die über die Nahrung verabreicht werden (zum Beispiel in Jogurt), um die Gesundheit positiv zu beeinflussen. Probiotische Erzeugnisse zum Fördern der Darmgesundheit gibt es schon länger; bei der Therapie oraler Erkrankungen ist das Prinzip hingegen noch relativ neu. Die Mikroorganismen lassen sich hier über Lutschtabletten oder in Form von Pulver zuführen. In der Mundhöhle angekommen, besetzen sie ökologische Nischen und können so dazu beitragen, eine ausgewogen zusammengesetzte Mundflora wiederherzustellen, in der pathogene Bakterienstämme nicht dominieren. Im Jahr 2016 hat eine Arbeitsgruppe um Ulrich Schlagenhauf vom Universitätsklinikum Würzburg in klinischen Versuchen nachgewiesen, dass Probiotika wie *Lactobacillus reuteri* Zahnfleischentzündungen bei schwangeren Frauen vorbeugen können. Das ist insofern bedeutsam, weil Schwangere häufig unter solchen Entzündungen leiden, bei ihnen aber besondere Vorsicht im Hinblick auf Arzneistofftherapien geboten ist.

Auch die künstliche Zufuhr von Enzymen, die natürlicherweise im Speichel vorkommen, ist ein biomimetisches Verfahren. Solche Proteine können entweder direkt antibakteriell wirken oder aber schädlichen Bakterien indirekt



Durch das Zahnbein hindurch führen feine Kanäle, die Dentintubuli, zum Zahnerv. Sie sind rasterelektronen mikroskopisch als Löcher in der Zahnoberfläche zu erkennen (1). Bei Zahnfleischerkrankungen können sie offen liegen, was schmerzempfindliche Zähne zur Folge hat. Bild 2 zeigt die parallel zueinander und senkrecht zur Zahnoberfläche verlaufenden Tubuli im Längsschnitt.

entgegenarbeiten, etwa indem sie Zuckermoleküle im Mund abbauen. Hier steht die Forschung allerdings noch am Anfang.

Mit den derzeitigen Methoden der Mundpflege lassen sich längst nicht alle Zahnbeläge entfernen, wie aus Untersuchungen hervorgeht. Risikozonen sind häufig die Zahnzwischenräume sowie die hinteren Backenzähne, die mit der Zahnbürste nur schwer erreichbar sind. Eine aktuelle Studie mit Zahnärzten, Zahnmedizinstudenten und Dentalassistenten hat ergeben, dass selbst Profis nicht sämtliche Beläge beim Zähneputzen komplett entfernen können. Bei zahnmedizinischen Laien ist der Anteil der entfernten Beläge noch viel geringer. Deshalb lässt sich sogar mit sehr gründlicher Pflege nicht vollständig verhindern, eines Tages auf Zahnersatz angewiesen zu sein.

Das Schicksal des Zahnersatzes: Zerreiben oder zerrieben werden

Biomimetische Ansätze können auch auf diesem Gebiet helfen. Es geht darum, synthetische Materialien herzustellen, welche die mechanischen Eigenschaften von natürlichem Zahnschmelz und Dentin möglichst genau imitieren. Klassische Zahnersatzmaterialien wie Keramiken, Kunststoffe, Amalgam oder Gold sind gänzlich anders zusammengesetzt als natürliche Zähne und werden daher nicht remineralisiert. Entsprechend haben sie der Abnutzung durch Kauen nichts entgegenzusetzen. Auch unterscheiden sie sich in ihrer Härte erheblich vom »Naturmaterial«. Keramiken sind deutlicher härter als Zahnschmelz; Kunststoffe dagegen viel weicher. Das kann dazu führen, dass eingesetzte Keramik den gegenüberliegenden Zahn mit der Zeit abnutzt oder, umgekehrt, Kunststoffersatz allmählich zerrieben wird. Hinzu kommen Phänomene wie das unterschiedliche Ausdehnungsverhalten bei Temperaturänderungen, die ein vorzeitiges Versagen der Klebeverbindungen zwischen Zahn und Ersatzmaterial herbeiführen können.

Ein weiterer Nachteil derzeitiger Füllstoffe sind mögliche toxische Effekte beispielsweise bei Amalgam (Freisetzung von Quecksilber) und Kunststoffen (Freisetzung toxischer Monomere), die immer wieder diskutiert werden. Diese Mängel versuchen Wissenschaftler mit innovativen, biomimetischen Zahnersatzmaterialien zu überwinden. Eine ideale Substanz hierfür wäre Hydroxylapatit mit der gleichen hierarchischen Struktur und den gleichen mechanischen Eigenschaften wie der natürliche Zahn. Im Rahmen einer Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Eisenforschung hat die Gruppe von Matthias Epple von der Universität Duisburg-Essen einen Ansatz entwickelt, bei dem die Zähne von Haien Pate standen (siehe Bilder S. 46 und 47).

Eine evolutive Besonderheit der Haie ist, dass ihr Zahnschmelz aus dem Mineral Fluorapatit besteht, welches dem Hydroxylapatit ähnelt. Die Fluorapatit-Kristallite sind aber viel länger gestreckt und auch etwas härter als die Kristallite in menschlichem Zahnschmelz. Dadurch lassen sie sich leichter gezielt anordnen, was bei biomimetischen Verfahren von Vorteil ist. Sie synthetisch herzustellen, gelingt bereits recht gut; die größere Herausforderung liegt darin, sie zur komplexen, dreidimensionalen Struktur des Haizahnschmelzes zusammenzufügen. Dem sind wir in Laborversuchen schon ziemlich nahe gekommen. Indem wir die annähernd parallelen Kristallite mit geeigneten Haftstoffen kombinieren, können wir ein Material herstellen, das sich zu Kronen oder Inlays formen lässt und dessen mechanische Eigenschaften weitgehend denen eines echten Zahns entsprechen. Noch sind wir nicht an dem Punkt, dies in die klinische Praxis umzusetzen. Wir erhoffen uns hier aber in den kommenden Jahren deutliche Fortschritte.

Biomimetische Konzepte sind schon heute in der Zahnmedizin bedeutsam. Künftig könnten sie die Mundpflege erheblich verbessern helfen und die Möglichkeiten, Zahn- und Zahnfleischerkrankungen vorzubeugen, noch deutlich erweitern. Dies gilt auch im Hinblick auf gut verträglichen Zahnersatz, der seinem natürlichen Vorbild näher kommt als die bisher üblichen Ersatzmaterialien. Biomimetische Strategien haben somit das Potenzial, auf längere Sicht hin die Zahngesundheit über alle Altersstufen hinweg nachhaltig zu verbessern.

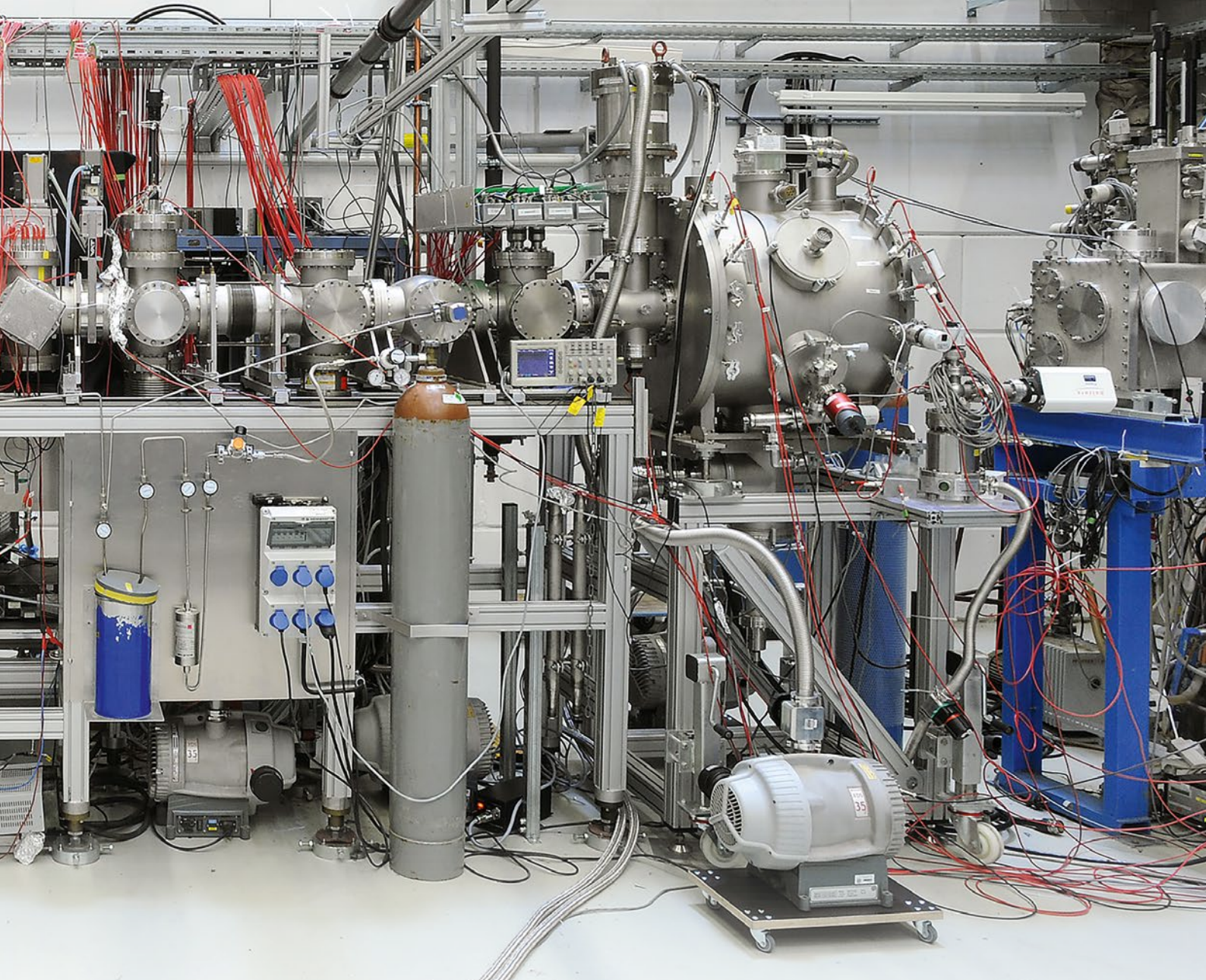
QUELLEN

- Enax, J., Epple, M.:** Synthetic Hydroxyapatite as a Biomimetic Oral Care Agent. In: Oral Health & Preventive Dentistry 16, S. 7–19, 2018
- Enax, J. et al.:** Ultrastructural Organization and Micromechanical Properties of Shark Tooth Enameloid. In: Acta Biomaterialia 10, S. 3959–3968, 2014
- Enax, J. et al.:** Structure, Composition, and Mechanical Properties of Shark Teeth. In: Journal of Structural Biology 178, S. 290–299, 2012
- Luebke, A. et al.:** Composites of Fluoroapatite and Methylmethacrylate-Based Polymers (PMMA) for Biomimetic Tooth Replacement. In: Bioinspiration & Biomimetics 11, 035001, 2016
- Meyer, F. et al.:** Overview of Calcium Phosphates used in Biomimetic Oral Care. In: The Open Dentistry Journal 12, S. 406–423, 2018



CHEMIE INSEL DER SCHWERGEWICHTE

Atome mit hohen Ordnungszahlen werden mit Teilchenbeschleunigern erzeugt und in hochempfindlichen Geräten vermessen, wie diesem am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt.



Wissenschaftler erzeugen Atome mit immer mehr Kernbausteinen und erweitern so das Periodensystem. Doch die neuen Elemente zerfallen extrem schnell wieder. Allmählich rücken freilich Kombinationen von Protonen und Neutronen in Reichweite, die theoretisch besonders stabil sein sollten.



Christoph E. Düllmann (links) ist Kernchemiker und erforscht die Synthese und die Eigenschaften superschwerer Elemente. **Michael Block** ist Kernphysiker und entwickelt Präzisionsmessungen für diese Atome und ihre Kerne. Beide arbeiten an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt und dem Helmholtz-Institut Mainz.

► spektrum.de/artikel/1603750

1080 Stunden lang hatten Forscher aus Russland und den USA mit einem Teilchenbeschleuniger Trillionen von Kalziumionen auf schwerere Atomkerne geschossen. Das Ergebnis des Dauerbombardements: drei Atome eines neuen Elements. Wenige Millisekunden später waren sie wieder verschwunden.

Nachdem die Wissenschaftler am russischen Vereinigten Institut für Kernforschung die infolge der Kernreaktion detektierten Signale und die emittierte Strahlung genau aufgeschlüsselt hatten, waren sie sich ziemlich sicher, einen Augenblick lang das Element Nummer 118 erzeugt zu haben, also Atome mit 118 Protonen im Kern. Nach Jahre dauernden, mehrmaligen Überprüfungen wurde es 2016 offiziell ins Periodensystem aufgenommen und Oganesson genannt, nach Juri Oganessian, dem 1933 geborenen russischen Pionier der Erforschung superschwerer Elemente.

Im vergangenen Jahrzehnt haben Forscher das Periodensystem ständig erweitert. Die Anzahl der Protonen im Atomkern – Ordnungszahl oder Kernladungszahl genannt – charakterisiert jeden Grundbaustein der Natur. Gleichzeitig mit Oganesson wurden die Elemente mit 113, 115 und 117 Protonen offizielle Mitglieder des Periodensystems. Einer von uns (Düllmann) hat einige der ersten chemischen Experimente mit verschiedenen Vertretern superschwerer Elemente durchgeführt, der andere (Block) hat an den ersten direkten Messungen ihrer Masse und anderen Untersuchungen gearbeitet. Jedes neu entdeckte

Element ist aufregend, weil es unbekannte Materie darstellt, der die Menschen nie zuvor begegnet sind. Wir können sie allerdings nicht behalten. Die wenigen Atome, die wir erschaffen, existieren nur einen Wimpernschlag lang. Dann zerfallen sie, weil sich die positiv geladenen Protonen im Kern gegenseitig abstoßen.

Vermutlich durchbrechen jedoch bestimmte noch unentdeckte superschwere Elemente und ihre Isotope – das sind Varianten mit unterschiedlicher Neutronenzahl – dieses Muster flüchtiger Existenzen. Einige könnten theoretisch über Minuten, Tage oder gar Jahre bestehen, bevor sie zerfallen. Sollte das tatsächlich der Fall sein, würden sie einer noch unerforschten Region im Periodensystem angehören, der so genannten Insel der Stabilität. Hier sorgt eine besondere Anordnung der Kernbausteine dafür, dass die Atome lange überdauern könnten, statt nur kurzlebige Laborprodukte zu sein. In letzter Zeit scheinen sich Forscher dem Ufer dieser Insel zu nähern.

Langsames Vortasten

zu völlig neuen Spielarten der Materie

Flerovium (Ordnungszahl 114) zum Beispiel zerfällt langsamer, als einige Berechnungen für ein derart protonenreiches Atom vorausgesagt hatten. Und die Halbwertszeit (die Zeit, nach der die Hälfte der Atome in leichtere Kerne zerfallen ist) einiger der neu entdeckten superschweren Elemente nimmt zu, je mehr der ladungsfreien Neutronen diese enthalten. Die Beobachtung deckt sich mit der Vermutung, dass die Insel der Stabilität irgendwo dort im Periodensystem liegt, wo Atome um die 114 Protonen enthalten sowie mehr Neutronen als alle bis heute im Labor erschaffenen Elemente. Die Lebensdauer ist deutlich länger als von theoretischen Modellen vorhergesagt, die keinen Einfluss einer Stabilitätsinsel berücksichtigen. Das hat unzählige Wissenschaftler dazu motiviert, schwere Elemente zu erforschen. Jetzt hoffen wir, die Grenzen der Insel der Stabilität zu kartieren und ihr Zentrum zu finden, in dem die langlebigsten Isotope liegen.

Inzwischen haben Forscher faszinierende Erkenntnisse über die seltsamen Bewohner der Extremregion des Periodensystems zusammengetragen. Die Laborverfahren sind inzwischen so weit entwickelt, dass wir bestimmen können, wie sich superschwere Elemente chemisch verhalten, etwa ob sie bei Raumtemperatur als Metall oder Gas vorliegen. Und sollten wir es jemals schaffen, größere Mengen dieser Elemente herzustellen, würden sie wohl Eigenschaften zeigen, die sie von allen bekannten Stoffen unterscheiden. Selbst wenn sie dafür zu schnell zerfallen, werden sie uns helfen, die Chemie und die grundlegenden Eigenschaften von Materie besser zu verstehen.

AUF EINEN BLICK ZUWACHS IM PERIODENSYSTEM

- 1** Wissenschaftler versuchen zunehmend schwerere, bislang unbeobachtete Elemente zu erzeugen. Die Techniken zur Synthese sowie zur Untersuchung der physikalischen und chemischen Eigenschaften werden dabei immer ausgefeilter.
- 2** Die meisten dieser Elemente sind äußerst kurzlebig. Theoretiker hoffen jedoch auf Atome mit »magischen« Anzahlen von Protonen und Neutronen, die lange stabil sind – vielleicht sogar über viele Jahre.
- 3** Derartige Atome würden die so genannte Insel der Stabilität im Periodensystem bilden. Forscher glauben, ihr mit einigen der jüngst entdeckten Elemente allmählich näher zu kommen.

Periodensystem der Elemente

Ordnungszahl
(Anzahl der Protonen im Kern)

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	* 57-71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	** 89-103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

119 120

Hypothetische Positionen der noch unentdeckten Elemente 119 und 120

Lanthanoide (*) und Actinoide (**) werden wegen ihrer ähnlichen chemischen Eigenschaften zusammengefasst.

*	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
**	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103

In der wichtigsten Tabelle der Chemiker sind alle bekannten Elemente nach der Anzahl der Protonen (Ordnungszahl) in ihrem Atomkern angeordnet. Forscher versuchen das Periodensystem zu erweitern, indem sie nach noch schwereren Elementen fahnden. Diese superschweren Elemente (rot) müssen im Labor erzeugt werden, da sie für ein natürliches Vorkommen zu instabil sind und umgehend wieder zerfallen.

JEN CHRISTENSEN, NACH CHRISTOPH DÜLLMANN / SCIENTIFIC-AMERICAN MÄRZ 2018

Die chemischen Elemente sind im Periodensystem systematisch zusammengefasst (siehe »Periodensystem der Elemente«, oben). Das Ordnungsprinzip wurde vor 150 Jahren vor allem von dem russischen Chemiker Dmitri Mendelejew und praktisch gleichzeitig von dem deutschen Chemiker Julius Lothar Meyer entwickelt. Es listet die Elemente nach der Anzahl ihrer Protonen auf und ordnet sie in den Spalten in Gruppen, die mit anderen Stoffen auf ähnliche Weise reagieren und Verbindungen eingehen.

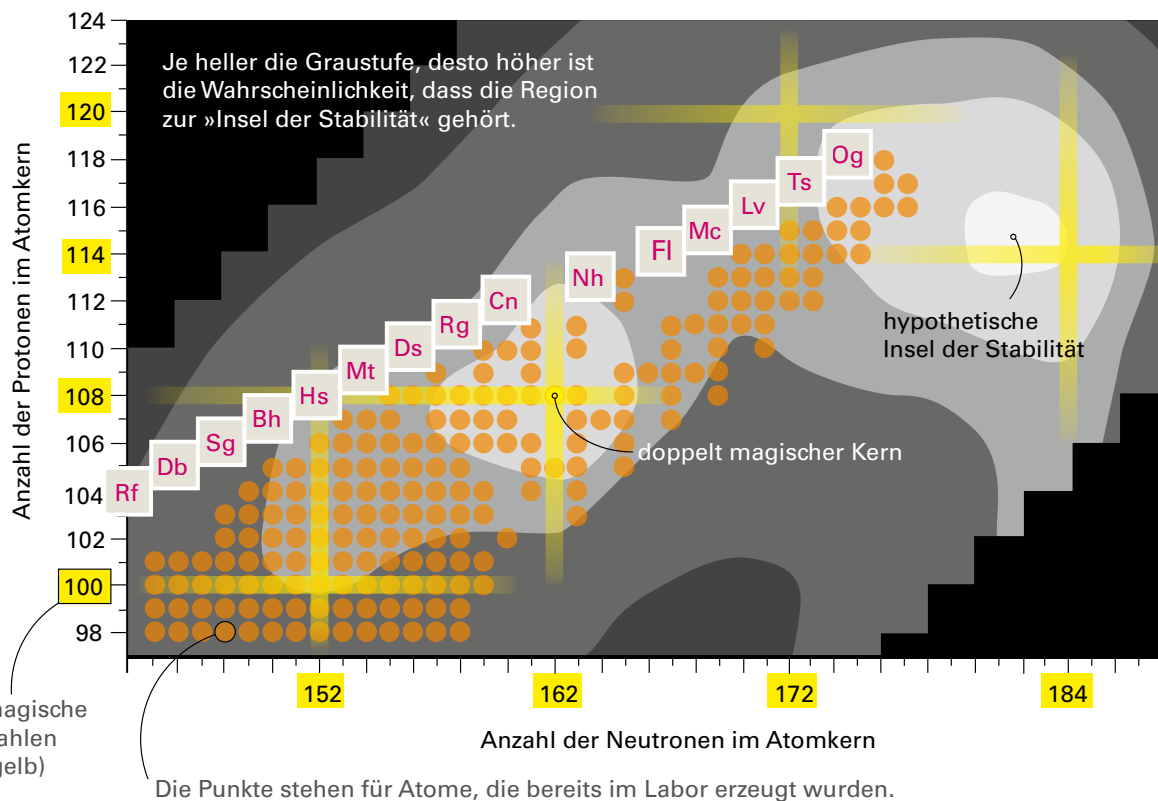
Seither fragen sich Forscher, wie weit sich das Periodensystem wohl erstreckt. Das schwerste Element, das man in größeren Mengen in der Natur findet, ist Uran mit 92 Protonen. Mit jedem zusätzlichen Proton nimmt die positive Ladung zu – und damit die Coloumb-Kraft, mit der sich Teilchen gleicher Ladung gegenseitig abstoßen. Sie wirkt der so genannten starken Wechselwirkung entgegen, die Atomkerne zusammenhält. Schwerere Kerne zerfallen darum tendenziell mit immer kürzerer Halbwertszeit.

Die Stabilität eines Elements hängt jedoch nicht nur von der Anzahl der Protonen ab, sondern auch davon, wie diese zusammen mit den Neutronen im Kern angeordnet sind. Die späteren Nobelpreisträger Maria Goeppert-Mayer und J. Hans D. Jensen haben in den späten 1940er Jahren ein Modell entwickelt, dem zufolge die Kernbausteine so

genannte Schalen besetzen. In ihnen findet eine bestimmte Anzahl an Protonen und Neutronen Platz – so wie Elektronen in den Elektronenschalen um den Atomkern. Atomkerne mit vollständig besetzten Schalen gelten als besonders stabil.

Wissenschaftler entwickelten das Schalenmodell für Atomkerne, als sie bestimmte »magische« Zahlen identifizierten: Kerne mit 2, 8, 20, 28, 50 oder 82 Protonen beziehungsweise Neutronen sind stabiler und zerfallen nicht so schnell wie andere. Die Zahlen entsprechen voll besetzten Schalen. Bei den heute bekannten Elementen sind sie für Protonen und Neutronen gleich, allerdings muss das nicht für unbekannte superschwere Elemente gelten. Sind in einem Kern sowohl die Protonenschalen als auch die Neutronenschalen voll besetzt, bezeichnet man ihn als doppelt magisch.

Vieles dabei verstehen Wissenschaftler noch nicht. Welches sind etwa die magischen Zahlen der noch unentdeckten Elemente? Theoretisch sollte es einen doppelt magischen superschweren Atomkern mit 114 Protonen und 184 Neutronen geben. Aber obwohl wir Element 114 im Labor herstellen können, haben wir bislang kein Fleroviumisotop mit 184 Neutronen erzeugt. Schon frühe Vorhersagen aus den 1960er Jahren ließen vermuten,



JEN CHRISTIANSEN, NACH CHRISTOPH DÜLLMANN / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2018

Insel der Stabilität

Jedes Proton in einem Atomkern erhöht die positive Ladung, die andere Protonen abstößt. Daher steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein instabiler Kern zerfällt, mit zunehmender Protonenzahl. Einige noch unentdeckte Kerne könnten sich dem Trend widersetzen, weil sie ganz bestimmte Anzahlen von Protonen und Neutronen enthalten. Die Teilchen besetzen im Kern jeweils so genannte Schalen. Wenn diese vollständig gefüllt sind, heißt die entsprechende Anzahl an Protonen und Neutronen magisch, und der Kern ist sehr stabil. Für einige Zahlenkombinationen ist der Effekt der Theorie nach besonders ausgeprägt. Zum Beispiel wird erwartet, dass 114 Protonen und 184 Neutronen eine doppelt magische Zahlenkombination ist, auch wenn Forscher noch kein Atom mit dieser Kombination an Kernbausteinen erzeugt haben. Sollten sie es schaffen, könnte es auf der hypothetischen Insel der Stabilität mit langlebigen superschweren Elementen liegen.

dass dieses Isotop unglaublich stabil sein würde, mit einer Halbwertszeit, die vielleicht an das Alter der Erde heranreicht. Damals kam zum ersten Mal die Idee einer Insel der Stabilität auf. Doch wir wissen nicht, ob 114 und 184 tatsächlich ein magisches Paar sind. Andere Berechnungen sagen Kombinationen aus 120 oder 126 Protonen und teilweise 172 statt 184 Neutronen vorher.

Die Bindungsenergie, die den Kern zusammenhält, ist eng mit einer zunächst verblüffenden Beobachtung verbunden: Die Masse eines Atoms ist geringer als die Summe der Massen seiner einzelnen Bausteine, also der freien Elektronen, Protonen und Neutronen. Albert Einstein lieferte mit seiner berühmten Formel $E=mc^2$ eine Erklärung für diesen so genannten Massendefekt. Die Gleichung

drückt aus, dass die scheinbar fehlende Masse tatsächlich in Form von Bindungsenergie vorliegt. Indem wir Atome mit unterschiedlicher Protonen- und Neutronenzahl wiegen, können wir Zusammensetzungen mit einer stärkeren Bindung identifizieren. So bestimmen wir, wie stabil die verschiedenen Kombinationen der Kernbausteine sind.

Welche Zahl auch immer die nächste magische sein wird – wir scheinen allmählich tatsächlich auf die Insel der Stabilität zuzusteuern. Die bisherigen Messdaten haben nämlich gezeigt, dass die Halbwertszeit superschwerer Elemente für eine gegebene Kernladungszahl mit der Anzahl an Neutronen zunimmt. Den Trend illustriert zum Beispiel Element 112 (Copernicium): Während das Isotop

Copernicium-277 mit 165 Neutronen lediglich etwa 0,6 Millisekunden lang besteht, ist Copernicium-285, das acht Neutronen mehr enthält, rund 50 000-mal stabiler. Das Muster setzt sich höchstwahrscheinlich bis zum Zentrum der Insel der Stabilität fort.

Diese theoretische Möglichkeit hat eine Suche nach superschweren Elementen auch in der Natur ausgelöst. Obwohl wir sie bislang nicht gefunden haben, so das Argument, könnten sich Spuren davon direkt vor unserer Nase befinden. Sie haben sich vielleicht neben anderen Elementen, die schwerer als Eisen sind, bei Kollisionen zweier Neutronensterne gebildet und anschließend im Universum verteilt. In dem Fall könnten sie in der kosmischen Strahlung vorhanden sein, die aus den Tiefen des Alls zu uns gelangt, oder in Gesteinen auf der Erde überlebt haben.

Mit verschiedenen Methoden wollen Forscher die Atome aufspüren. So deuten Berechnungen darauf hin, dass Element 110 (Darmstadtium) recht stabil wäre und sich chemisch ähnlich wie Platin verhalten könnte, falls es die magische Anzahl von 184 Neutronen enthält. Mittels Röntgenfluoreszenz und Massenspektrometrie haben Experten nach Darmstadtium in Platinerzen gefahndet, waren bei der Suche aber nie erfolgreich. Die Resultate zeigen, dass die Häufigkeit unterhalb von einem Darmstadtiumatom pro einer Milliarde Teilchen liegen muss.

Von der erfolglosen Suche in der Natur zur künstlichen Produktion im Labor

Auch von der kosmischen Strahlung erhoffen sich Wissenschaftler schon länger Hinweise auf superschwere Elemente. Zum Beispiel befand sich an Bord der Long Duration Exposure Facility, eines NASA-Satelliten aus den 1980er Jahren, das Ultra Heavy Cosmic-Ray Experiment. Bis heute gibt es jedoch keine eindeutigen Belege. Die Bemühungen werden weitergehen – schließlich wäre eine Entdeckung außerordentlich bedeutsam. Nicht zuletzt könnten neue Elemente die Synthese von Materialien mit einzigartigen Eigenschaften erlauben.

Da in der Natur noch keine superschweren Elemente gefunden wurden, müssen wir sie im Labor erschaffen. Dazu reichern wir die Atomkerne gewöhnlicher Elemente mit noch mehr Protonen an. Bis zu einem gewissen Punkt können wir so die energiereichen kosmischen Prozesse imitieren, bei denen schwere Elemente entstehen. Kerne, die zu viele Neutronen enthalten, neigen zum so genannten Betazerfall, bei dem ein Neutron zu einem Proton wird. So bildet sich ein Element mit einer um eine Einheit größeren Ordnungszahl. Durch den Beschuss schwerer Atome mit Neutronen können wir Elemente bis zur Ordnungszahl 100 (Fermium) erzeugen. Bei keinem Fermiumisotop oder den noch schwereren Elementen ist jedoch bislang ein solcher Betazerfall beobachtet worden.

Um Elemente mit Ordnungszahlen von 100 und höher herzustellen – wie etwa das eingangs vorgestellte Oganesson –, bringen Forscher zwei Kerne so nahe zusammen, dass sich die starke Wechselwirkung bemerkbar macht. Diese Kraft hat eine extrem kurze Reichweite; darum müssen sich die Kerne fast berühren, um sie zu spüren. Für einen solch geringen Abstand ist es nötig, die Absto-

ßungskraft der positiv geladenen Protonen zu überwinden. Dazu beschleunigen wir einen der Kerne auf zirka ein Zehntel der Lichtgeschwindigkeit und schießen ihn auf den anderen. Dieser Impuls reicht gerade eben aus, die Coulomb-Kraft zu überwinden und Oberflächenkontakt zwischen den beiden Kernen herzustellen. Die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Volltreffer ist allerdings extrem gering. Darüber hinaus fusionieren zwei Kerne umso schlechter, je mehr Protonen involviert sind. Und selbst wenn ein verschmolzener so genannter Verbundkern entsteht, zerfällt dieser oft umgehend wieder in leichtere Fragmente. Die geringe Chance, überhaupt einen Verbundkern zu erhalten, und das hohe Risiko für dessen Zerfall machen es äußerst schwierig, immer schwerere Elemente zu synthetisieren.

Trotzdem sind Forscher damit sehr erfolgreich gewesen: Die Elemente mit den Ordnungszahlen 113, 115, 117 und 118 wurden alle auf diese Weise erschaffen und von der Internationalen Union für reine und angewandte Chemie (IUPAC) 2016 offiziell anerkannt. Element 113 bekam den Namen Nihonium. Nihon ist eine von zwei Arten, auf Japanisch »Japan« zu sagen – unter anderem dort wurden die Atome hergestellt. Auch Element 115, Moscovium, heißt nach dem Ort seiner Entdeckung, dem Vereinigten Institut für Kernforschung nahe Moskau. Nummer 117, Tenness, ehrt den US-Bundesstaat Tennessee – das dort beheimatete Oak Ridge National Laboratory steuerte Berkelium (Ordnungszahl 97) zur Synthese des Elements bei. Das 118 Protonen schwere Oganesson komplettiert die neuen Mitglieder des Periodensystems.

Nun fahnden Forscher unter Hochdruck nach Nummer 119, die dem Periodensystem eine neue Zeile hinzufügen würde. Obwohl mehrere Teams – inklusive unserer eigenen – an den weltweit leistungsfähigsten Teilchenbe-

Die Elemente zerfallen schnell, trotzdem verraten neue Messtechniken einiges über ihre chemischen Eigenschaften

schleunigern Wochen und Monate investiert haben, war die Kampagne bislang nicht erfolgreich. Ein Hindernis: Die Methode, die zu Oganesson und anderen superschweren Elementen führte, funktioniert nur bis zur Ordnungszahl 118. Leider gibt es keine ausreichenden Mengen an Kernen mit mehr als 98 Protonen, auf die man Kalziumionen (20 Protonen) schießen könnte. Wissenschaftler versuchen deshalb herauszufinden, welche Kombinationen verfügbarer und bekannter Elemente die besten Chancen bieten, noch unbekanntes zu erzeugen.

Die neuen Elemente zerfallen blitzschnell, doch es gibt große Fortschritte bei den Messtechniken, die uns trotz der kurzen Lebensdauer einiges über ihre chemischen Eigenschaften verraten können. Das schwerste derart

untersuchte Element ist Flerovium (Nummer 114). Im Periodensystem sitzt es direkt unter Blei, es sollte also ein Schwermetall sein. Aber laut theoretischen Erwägungen, die bis ins Jahr 1975 zurückreichen, verhält es sich möglicherweise eher wie ein Edelgas, das kaum mit anderen Stoffen reagiert.

Das Verhalten hängt letztlich von den vielen Protonen im Kern ab. Die extrem hohe positive Ladung der Atomkerne schwerer Elemente beschleunigt die negativ geladenen Elektronen in deren Hülle auf bis zu 80 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Das erzeugt ganz anders geformte und gelagerte Bahnen als bei den Elektronen leichterer Elemente. Bei Flerovium beispielsweise liegen die Energieniveaus der beiden äußeren Elektronenschalen deutlich weiter auseinander als in vergleichbaren, aber kleineren Atomen wie Blei. Wenn Blei eine chemische Bindung eingeht, liefert dieser Vorgang eher die nötige Elektronenenergie, um den Abstand zu überwinden, als es bei Flerovium der Fall wäre. Flerovium ist daher möglicherweise deutlich reaktionsträger als sein eine Periode höher stehendes Pendant. Darum könnte es eher einem Edelgas ähneln als einem typischen Metall wie Blei.

Das ist jedoch schwer genau vorherzusagen. Verschiedene Theorien sind sich einig darin, dass Flerovium relativ reaktionsträge sein sollte. Aber vermutlich ist es reaktiver als echte Edelgase und könnte etwa schwache metallische Bindungen mit Elementen wie Gold eingehen. Da es bisher nicht gelungen ist, Flerovium in größeren Mengen herzustellen, weiß niemand, wie es aussieht. Manche Vorhersagen gehen davon aus, dass es eine silbrig weiße oder blassgraue Farbe hat und bei Raumtemperatur fest ist.

Die möglichen Eigenschaften von Flerovium faszinieren die Forscher und haben sie zu verschiedensten Experimenten angespornt, obwohl sich nur wenige Atome des Elements pro Tag erzeugen lassen. Obendrein haben selbst die langlebigsten aktuell bekannten Fleroviumisoto-

in einem Abstand von etwa einem halben Millimeter gegenüberstehen. So bildet die Anordnung der Detektoren einen engen Kanal. Ein schnell fließendes Trägergas zwingt das Flerovium hier hindurch. Die Detektoren sind mit einer dünnen Goldschicht überzogen, mit der wir die Wechselwirkung von Flerovium mit dem Metall untersuchen können. Beim Einlass in den Detektorkanal herrscht Raumtemperatur. Sollte Flerovium chemisch einem Metall ähneln, würde es sich in diesem Bereich beim Kontakt an die Goldoberfläche anheften und dort bis zu seinem Zerfall verweilen. Das Ende des Kanals kühlen wir mit flüssigem Stickstoff auf unter minus 160 Grad Celsius. Denn die für Edelgase typischen schwachen Bindungen halten Atome nur bei sehr niedrigen Temperaturen fest. Sollte sich Flerovium wie ein solches verhalten, würde es also erst im hinteren Teil des Kanals an der Oberfläche andocken – wenn überhaupt.

Mit Detektoren und Laserlicht auf der Spur der atomaren Struktur

Während eines Versuchs an der TASCA beobachtete unsere Forschungsgruppe zwei Atome, die im ungekühlten Bereich des Detektorkanals zerfielen. Flerovium schien also eine metallähnliche Bindung eingegangen zu sein. Ein zuvor in Russland durchgeführtes Experiment lieferte drei Fleroviumatome. Eines davon zerfiel ebenfalls bei Raumtemperatur, die anderen zwei detektierten die beteiligten Forscher vom schweizerischen Paul Scherrer Institut hingegen bei etwa minus 90 Grad Celsius. Das interpretierten die Forscher als edelgasähnliches Verhalten. Wir analysieren inzwischen neue Daten, die wir am Helmholtzzentrum gewonnen haben, um die Eigenschaften dieses spannenden Elements zu klären.

Ein anderer Zugang zu den chemischen Eigenschaften ist es, die atomare Struktur zu untersuchen, indem man die Elektronenbahnen mit Hilfe von Lasern vermisst. Im September 2016 und im Juni 2018 publizierten wir mit unseren Teams die Ergebnisse der ersten Laserspektroskopie-Experimente mit dem superschweren Element Nobelium (Ordnungszahl 102). Zunächst stellten wir mehrere Nobeliumatome pro Sekunde her, indem wir Bleiatome (82 Protonen) mit Kalziumatomen (20 Protonen) bombardierten. Anschließend bremsten wir sie in Argongas ab und beschossen sie mit Laserpulsen. Hatten die Pulse die richtige Energie, konnte ein Elektron sie absorbieren und gewann dadurch genügend Energie, dass es dem Nobelium entfliehen konnte. Indem wir die Frequenz des Lasers variierten, ließ sich präzise die zur Entfernung des Elektrons nötige Energie messen. Diese so genannte Ionisierungsenergie ist eine der charakteristischen Eigenschaften chemischer Elemente. Sie bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Element mit anderen reagiert und eine Bindung eingeht. Wir haben diese Versuche zuerst mit Nobelium-254 durchgeführt und sie später auf die Isotope mit 252 und 253 Kernteilchen ausgedehnt, um zu verstehen, wie sich die Anzahl an Neutronen auf die energetische Lage des Elektronenniveaus auswirkt. Die Ergebnisse verraten etwas über die Gestalt der positiv geladenen Atomkerne der Isotope – je nach deren Größe

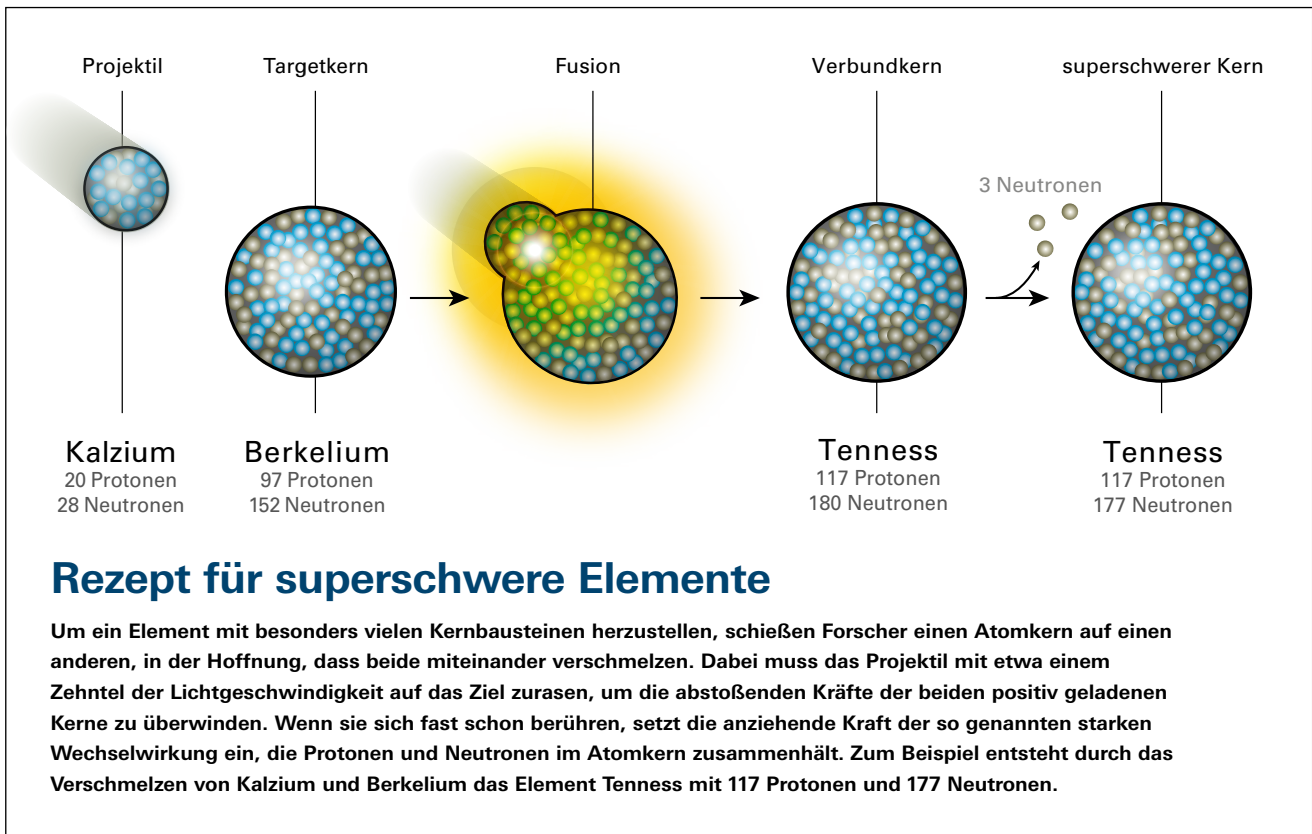


FOTOLIA / LILY

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

pe nur eine Halbwertszeit von ein bis zwei Sekunden. Eine der besten Anlagen zur Synthese von Flerovium ist die TransActiniden-Separator und Chemie Apparatur (TASCA; Transactinide sind Elemente ab Ordnungszahl 104) am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt. Dort beschießen wir eine rotierende Zielscheibe, die mit Plutonium-244 beschichtet ist, mit Kalzium-48. Wenn dabei Fleroviumatome entstehen, lenkt ein Magnet sie in ein Trägergas, das sie in ein spezielles Instrument spült. Dieses besteht aus zwei 32 Zentimeter langen, mit Siliziumdetektoren versehenen Halbschalen, die sich jeweils



und Form ändert sich das Verhalten der sie umkreisenden Elektronen. Obwohl sich das Elektronenniveau dadurch nur um zirka ein Millionstel ändert, lässt sich der Effekt bestimmen. Man beobachtet dabei den Zuwachs der Größe des Atomkerns durch das Hinzufügen von Neutronen. Außerdem bestätigen die Messungen, dass der Nobeliumatomkern in diesen Isotopen wie ein amerikanischer Football geformt ist. Die theoretischen Kernmodelle, die unsere Daten gut beschreiben, sagen sogar vorher, dass die schweren Atomkerne nicht homogene Körper sind, sondern durch eine deutlich reduzierte Protonendichte im Zentrum eine hohle Struktur entwickeln.

Wissenschaftler haben auch schon chemische Bindungen zwischen superschweren Elementen und leichteren Atomen geknüpft. Ein Beispiel ist die Synthese eines Moleküls mit Seaborgium (Element 106). 2013 hat eine Gruppe von Forschern um einen von uns (Düllmann) bei einem Versuch am japanischen RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science Seaborgiumisotope mit einer Halbwertszeit von rund zehn Sekunden erzeugt. Nach anschließender Zugabe von Kohlenmonoxid bildete das schwere Element eine Hexacarbonyl-Verbindung, in der sich sechs Moleküle Kohlenmonoxid um ein zentrales Seaborgiumatom lagerten.

Seaborgium verhielt sich ähnlich wie seine bekannteren Verwandten Wolfram und Molybdän, die gleich viele Valenzelektronen besitzen, also Elektronen in der äußersten Schale. Während des etwa zweiwöchigen Experiment ging Seaborgium mit Kohlenmonoxid dieselbe Hexacarbo-

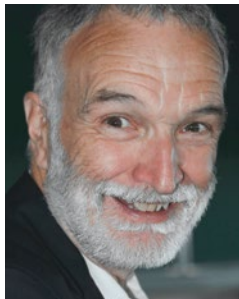
nyl-Verbindung ein wie Wolfram und Molybdän, und es zeigte obendrein eine ähnliche Wechselwirkung mit Siliziumoxid-Oberflächen. Eine der nächsten Fragen, die zu klären sind, lautet, welches der drei Elemente das stabilste Hexacarbonyl-Molekül bildet. Die ersten Berechnungen aus den späten 1990er Jahren deuteten auf Seaborgium hin, neuere sehen hingegen Wolfram vorne.

Dies sind nur einige Beispiele für die Art von Versuchen, die Wissenschaftler mit superschweren Elementen durchführen, und für die vielen offenen Fragen, die sie damit zu beantworten hoffen. Zwar sind die neuesten Mitglieder des Periodensystems zugegebenermaßen recht exotisch. Dennoch liefern Experimente immer mehr Informationen darüber, wie sie in das Schema passen, das vor 150 Jahren auf Grundlage alltäglicher Elemente erstellt wurde. Unabhängig davon, ob wir das Zentrum der Insel der Stabilität jemals erreichen und ob sich die dortigen Elemente tatsächlich als so langlebig herausstellen werden, erfahren wir bereits jetzt anhand superschwerer Elemente viel über die chemischen Grundbausteine der Natur. ◀

QUELLEN

- Düllmann, C. E. et al. (Hg.):** Special Issue on Superheavy Elements. Nuclear Physics A 944, 2015
- Laatiaoui, M. et al.:** Atom-at-a-Time Laser Resonance Ionization Spectroscopy of Nobelium. In: Nature 538, S. 495–498, 2016
- Raeder, S. et al.:** Probing Sizes and Shapes of Nobelium Isotopes by Laser Spectroscopy. In: Physical Review Letters 120, 232503, 2018

SCHLICHTING! VIELSCHICHTIGE UMTRIEBE IM LATTE MACCHIATO



Manche heißen Flüssigkeitsgemische bilden beim Abkühlen physikalisch interessante Strukturen.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster.

» spektrum.de/artikel/1603752

Ein Mathematiker ist eine Maschine, die Kaffee in Sätze verwandelt

Alfréd Rényi (1921–1970)

► Ob einem Latte macchiato nun schmeckt oder nicht – rein ästhetisch sind die unterschiedlich getönten Schichten der Kaffeespezialität auf jeden Fall beachtenswert. Diese Strukturbildung ist eine Folge verschiedener physikalischer Vorgänge, deren Zusammenwirken auch in ganz anderen Kontexten eine wichtige Rolle spielt, etwa beim Verhalten des Golfstroms.

Das Herstellungsprinzip von Latte macchiato ist einfach: In ein Glas mit 60 bis 70 Grad Celsius warmer Milch wird heißer Espresso gegeben. An den verschiedenen Stellen der Mischung ist das dortige Verhältnis der Flüssigkeiten gut anhand der Färbung zu erkennen: Im unteren, hellen Bereich dominiert die Milch, nach oben hin nimmt der Anteil von Espresso zu, wenn man von der oft vorhandenen Schaumkrone absieht, die hier außer Betracht bleiben soll.

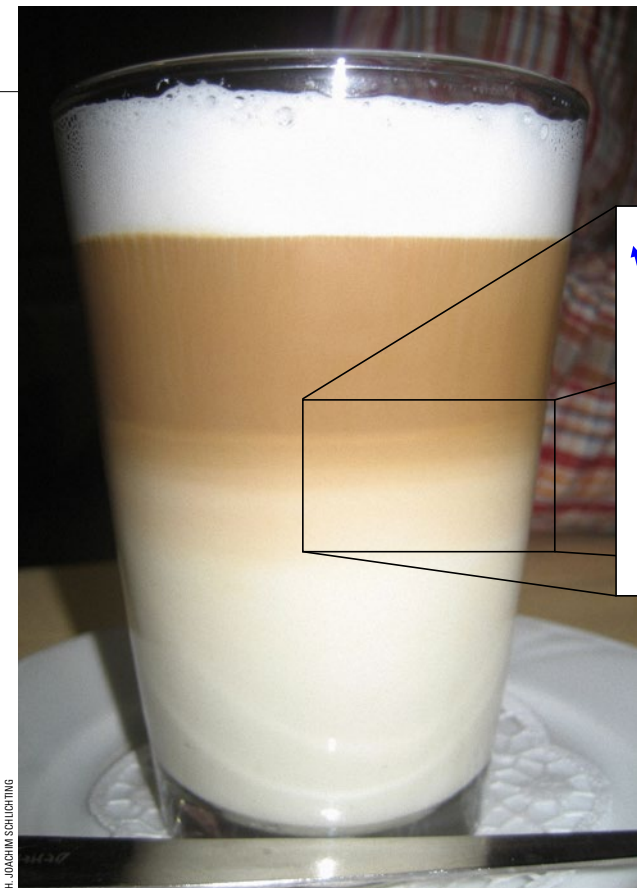
Die Milch hat eine größere Dichte als der Espresso, dessen Dichte näherungsweise der von Wasser entspricht. Darum ist die geschichtete Anordnung recht stabil. Der Dichteunterschied zwischen den beiden Flüssigkeiten wird obendrein durch die höhere Temperatur des Espresso verstärkt – die Dichte nimmt normalerweise ab, wenn etwas heißer wird. Der leichtere Espresso vermengt sich überhaupt nur deshalb teilweise mit Milch, weil das Eingießen je nach Geschwindigkeit mehr oder weniger turbulente Bewegungen auslöst. Doch selbst bei einer sehr schwingvollen Vereinigung entsteht im hohen Glas keine homogene Mischung. Sobald sich die Aufregung gelegt hat, drängt der Espresso infolge von Auftriebskräften nach oben.

Am Boden ist die schwere Milch von den Turbulenzen weitgehend verschont geblieben und strahlt nach wie vor weiß. Darüber entstehen oft deutlich erkennbar weitere, voneinander klar abgegrenzte Schichten abweichenden Mischungsgrads und damit verschiedener mittlerer Dichte. Deren Ursache erschließt sich einem nicht sofort. Selbst eine Stunde nach Fertigstellung des Getränks, wenn es bereits an geschmacklicher Qualität eingebüßt und nahezu Raumtemperatur angenommen hat, sind die Lagen oft noch andeutungsweise zu erkennen. Umgekehrt gibt es keine solche Schichtung, wenn man die Flüssigkeiten bei Umgebungstemperatur vereinigt oder den Espresso sehr langsam zufügt.

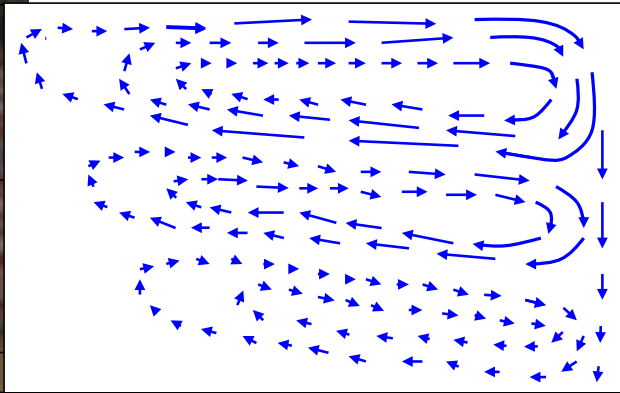
Ausgleich auf Umwegen

Während des Eingießens dominieren die mechanische Verwirbelung und die trägheitsbedingte gegenseitige Durchdringung der Zutaten das Geschehen. Unter dem Einfluss der Gravitation treibt das Dichtegefälle in der zusammengesetzten Flüssigkeit Bewegungen an, die darauf hinauslaufen, die Differenzen zu beseitigen. Im vorliegenden Fall variiert die Dichte sowohl auf Grund der verschiedenen Zusammensetzung als auch wegen der unterschiedlichen Temperatur. Dadurch kommt es bei den gravitationsbedingten Ausgleichsbewegungen zu einem interessanten Wechselspiel. Fachleute sprechen von »doppelt-diffusiver Konvektion«.

Bei einer normalen Tasse heißen Kaffees entwickelt sich eine einfache Konvektionsbewegung: Der haupt-



H. JOACHIM SCHLICHTING



Einige Zeit nach seiner Zubereitung hat sich im Latte macchiato eine Schichtstruktur ausgebildet. Am Boden ist noch unberührte Milch, oben hat sich Milchschaum abgesetzt. Dazwischen sind Lagen unterschiedlichen Mischungsgrads zu erkennen. Der Querschnitt durch drei Schichten im Getränk illustriert die dortigen Konvektionsbewegungen von der Mitte zum Glasrand. Die Länge der Pfeile soll die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsteilchen andeuten.

sächlich an der Oberfläche und am Tassenrand abgekühlte Kaffee sinkt an den Seiten ab, zum Ausgleich steigt in der Mitte wärmerer auf.

Beim Latte macchiato hingegen liegen die Verhältnisse etwas komplizierter: Die Flüssigkeit gibt vor allem in der Nähe des Glasrands Energie durch Wärme an die Umgebung ab und wird ein wenig kühler. Dadurch nimmt ihre Dichte zu, und sie sinkt in kleinen Strahlen ab, was manchmal am Rand des Glases zu erkennen ist (siehe andeutungsweise oben links im Foto oben). Die niedergehende kühlere Flüssigkeit gerät so in Regionen immer höherer Milchkonzentration und damit zunehmender Dichte. Dadurch wird sie langsamer.

Wenn ihre Dichte dem Wert der Umgebung entspricht, endet der Sinkprozess, und die Flüssigkeit strömt auf einer Linie gleicher Dichte (Isodense) zur warmen Mitte des Glases. Dort treffen alle entsprechenden Ströme vom Rand her zusammen und steigen – inzwischen wieder etwas wärmer und damit leichter geworden – gemeinsam auf. Somit schließt sich ein Kreislauf (siehe Illustration oben). Die Konvektionsströmung wird durch den nach unten hin zunehmenden Milchanteil stabilisiert. Einen anschaulichen Eindruck von der Haltbarkeit der einzelnen Lagen kann man sich verschaffen, indem man das Kaffeeglas leicht bewegt. Die Schichten schwanken dabei ein wenig, doch kurz danach ist alles wieder, wie es war.

Wie viele Abschnitte sich unterhalb der obersten Konvektionszone nach demselben Schema ausbilden, hängt von mehreren Bedingungen ab, insbesondere dem

Dichtegradienten. Dessen Verlauf wird weitgehend dadurch bestimmt, wie impulsiv der Espresso in die Milch eingegossen wird. Bei sehr wenig Schwung liegt am Ende fast reiner Espresso auf der weißen Milch, es gibt also nur eine Schicht. Mehrere davon entstehen erst oberhalb einer kritischen Injektionsgeschwindigkeit.

Die Umwälzungen wirken lange nach

Die Strukturbildung ist grundsätzlich vor allem der Tatsache zu verdanken, dass der thermische Ausgleich wesentlich schneller abläuft als der Diffusionsvorgang, der den Dichtegradienten der Mischung von Milch und Espresso abbaut. Der treibende Prozess der Schichtung ist die Dissipation – das heißt eine unumkehrbare Übertragung – von thermischer Energie über den Glasrand an die Umgebung. Man kann den Latte macchiato also mit Recht eine dissipative Struktur im Sinn der nichtlinearen Physik nennen. Sie bleibt so lange bestehen, wie die Temperaturdifferenz zwischen der Umgebung und dem Getränk aufrechterhalten wird. Obwohl dieses im Lauf der Zeit abkühlt, ist der Effekt dennoch lange zu bewundern, und erst allmählich ändern sich die Größe und die Anzahl der Schichten. Aber bevor es so weit kommt, hat man sich hoffentlich bereits am Latte macchiato selbst erfreut.

QUELLE

Xue, N. et al.: Laboratory Layered Latte. In: Nature Communications 8, 1960, 2017

ASTRONOMIE DER STAMMBAUM DER SONNE

Vier Akte im Leben der Sonne

Vorfahr

Ein Vorgängerstern der Sonne könnte einige zehn Millionen Jahre vor dieser entstanden und bald darauf in einer Supernova-Explosion vergangen sein. Diese schleuderte Atome ins Weltall, unter anderem das radioaktive Aluminium-26, die zum Teil zum Baumaterial der Sonne und der Planeten des Sonnensystems wurden. 2012 taufte Astronomen diesen hypothetischen Stern »Coatlicue«.

Geschwister

Die Sonne leuchtete erstmals auf, als sich Teile einer ausgedehnten Wolke aus Gas und Staub so verdichtet und aufgeheizt hatten, dass Atomkerne miteinander verschmolzen. Insgesamt gingen aus der Wolke wohl zwischen einigen hundert und 10 000 Sterne hervor. Diese entfernen sich seither voneinander. Forscher suchen in der Milchstraße nach Sternen, die vermutlich gemeinsam mit der Sonne entstanden sind, und konnten bereits einen Kandidaten identifizieren.

Neue Forschungsergebnisse decken die überraschende Vergangenheit unseres Zentralgestirns auf – und geben Hinweise auf seine Zukunft.



Rebecca Boyle ist Wissenschaftsjournalistin in Saint Louis, Missouri.

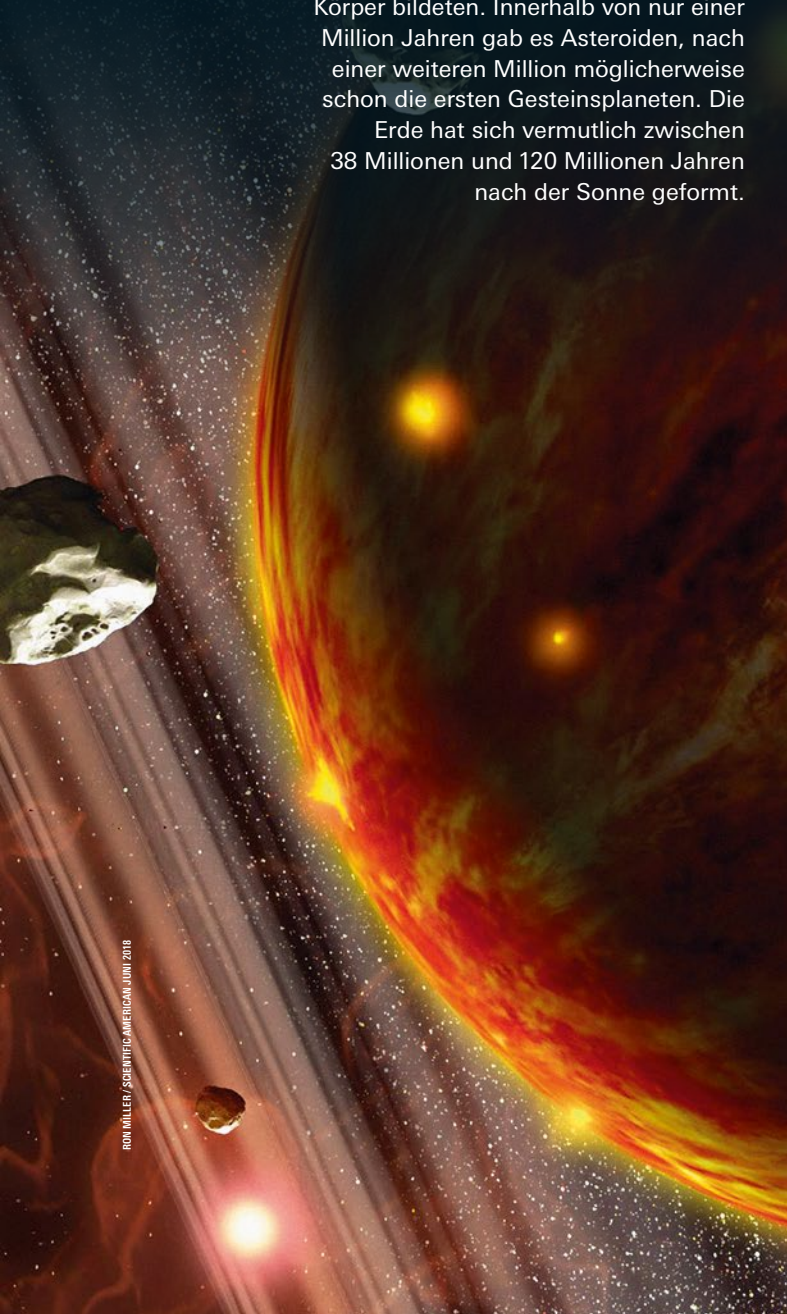
» spektrum.de/artikel/1603754

Kindheit

Um die junge Sonne kreisten Staubkörnchen, die sich sammelten und kleinere Körper bildeten. Innerhalb von nur einer Million Jahren gab es Asteroiden, nach einer weiteren Million möglicherweise schon die ersten Gesteinsplaneten. Die Erde hat sich vermutlich zwischen 38 Millionen und 120 Millionen Jahren nach der Sonne geformt.

Tod

In etwa fünf Milliarden Jahren wird die Sonne verglühen und ihre Außenschichten abstoßen, die zu einem leuchtenden Planetarischen Nebel werden. In dessen Zentrum glimmt dann der Überrest der Sonnenkerns als Weißer Zwerg. Die inneren Planeten, vielleicht auch die Erde, werden von der Sonne in der Endphase ihres Lebens verschluckt, doch die Objekte im äußeren Sonnensystem könnten die Ereignisse überdauern.



RON MILLER / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2018



▶ Vor 4,6 Milliarden Jahren war das Material, aus dem bald darauf unser Sonnensystem entstehen sollte, in einer kalten und dunklen Umgebung weit verteilt. Die Sonne gab es noch nicht, bloß eine hauchdünne Wolke aus den Überresten früherer Sterne, angereichert mit Elementen, die sich in unvorstellbar gewaltigen Katastrophen gebildet hatten. Bis zu einem folgenreichen Ereignis.

Vielleicht rüttelte die Gravitation eines vorüberziehenden himmlischen Nomaden an der Wolke. Oder ein weiter entfernter Stern verging, und der Hauch seiner Explosion schob die Atome zusammen, so wie ein Windstoß Herbstlaub zu einem Haufen wirbelt. Was auch immer die Ursache war: Die Atome rückten näher aneinander, und die Gaswolke wurde unaufhaltsam dichter. Schließlich heizte sich die zusammenströmende Materie so sehr auf, dass Wasserstoff zu Helium fusionierte. Die Sonne war geboren, und wenig später entstand in ihrem Umfeld unter anderem die Erde.

Diese relativ einfache Geschichte unserer näheren kosmischen Umgebung entwickelte sich in letzter Zeit zu einer wesentlich reichhaltigeren und komplexeren Biografie. Leistungsstarke Weltraumteleskope, das aufblühende Forschungsgebiet der »Kosmochemie« sowie an die Genealogie angelehnte Methoden haben den Astronomen neue Einblicke in die Vergangenheit unseres Zentralgestirns gewährt. Heute wissen sie: Die Sonne war nicht immer eine Einzelgängerin. Sie hatte Geschwister – und hat möglicherweise sogar einen Planeten adoptiert. Ebenso gab es eine Art Mutter, einen Riesenstern, dessen kurzes Leben das Material für das Sonnensystem lieferte. Diese Bausteine könnten mindestens 30 Millionen Jahre lang vom Rest der Galaxie isoliert existiert haben.

Auch die Sonne wird vergehen. Sie wird in etwa fünf Milliarden Jahren ihren Wasserstoffvorrat allmählich aufbrauchen und sich zu einem Riesenstern aufblähen, dessen Außenbereiche sich sogar bis zu unserem Planeten

erstrecken könnten. Die Wissenschaftler erforschen den möglichen Einfluss der sterbenden Sonne auf das interstellare Medium, also auf das Gas und den Staub zwischen den Sternen, und die Auswirkungen auf die Beschaffenheit künftiger Sterne und der galaktischen Umgebung. Stößt die Sonne durch ihren Tod vielleicht selbst wiederum die Entstehung neuer Sterne und Planeten an?

Indem sie die Vergangenheit, die Gegenwart und die Zukunft der Sonne ergründen, erzählen die Astronomen außerdem mehr als eine lokal begrenzte Geschichte. Von den unfassbar vielen Sternen kennen wir schließlich nur diesen aus der Nähe. Jede Einsicht liefert uns indirekt Informationen über weit entfernte Objekte, die wir niemals so genau kennen lernen werden.

Womöglich erbrütete ein gewaltiger Stern die Grundzutaten des Sonnensystems

Einige der ersten galaktischen Sterne vergingen bereits wenige Millionen Jahre nach ihrem Auftreten und verteilten dabei schwere Elemente wie Eisen und Aluminium im All. Ihre Überreste stellten das Baumaterial neuer Sternengenerationen und brachten schließlich die Vorgänger der Sonne hervor. Astronomen rekonstruieren die Geschehnisse anhand übrig gebliebener Brocken aus der Anfangszeit des Sonnensystems. Dazu vergleichen sie den Anteil unterschiedlicher radioaktiver Isotope in Meteoriten einerseits mit dem interstellaren Medium der Milchstraße andererseits, das stetig durch den Tod weiterer Sterne Nachschub erhält. Die Atome zerfallen mit einer spezifischen Rate, und Unterschiede in den jeweiligen Mengen dienen entsprechend als Uhr für die Entstehungszeitpunkte der Bausteine.

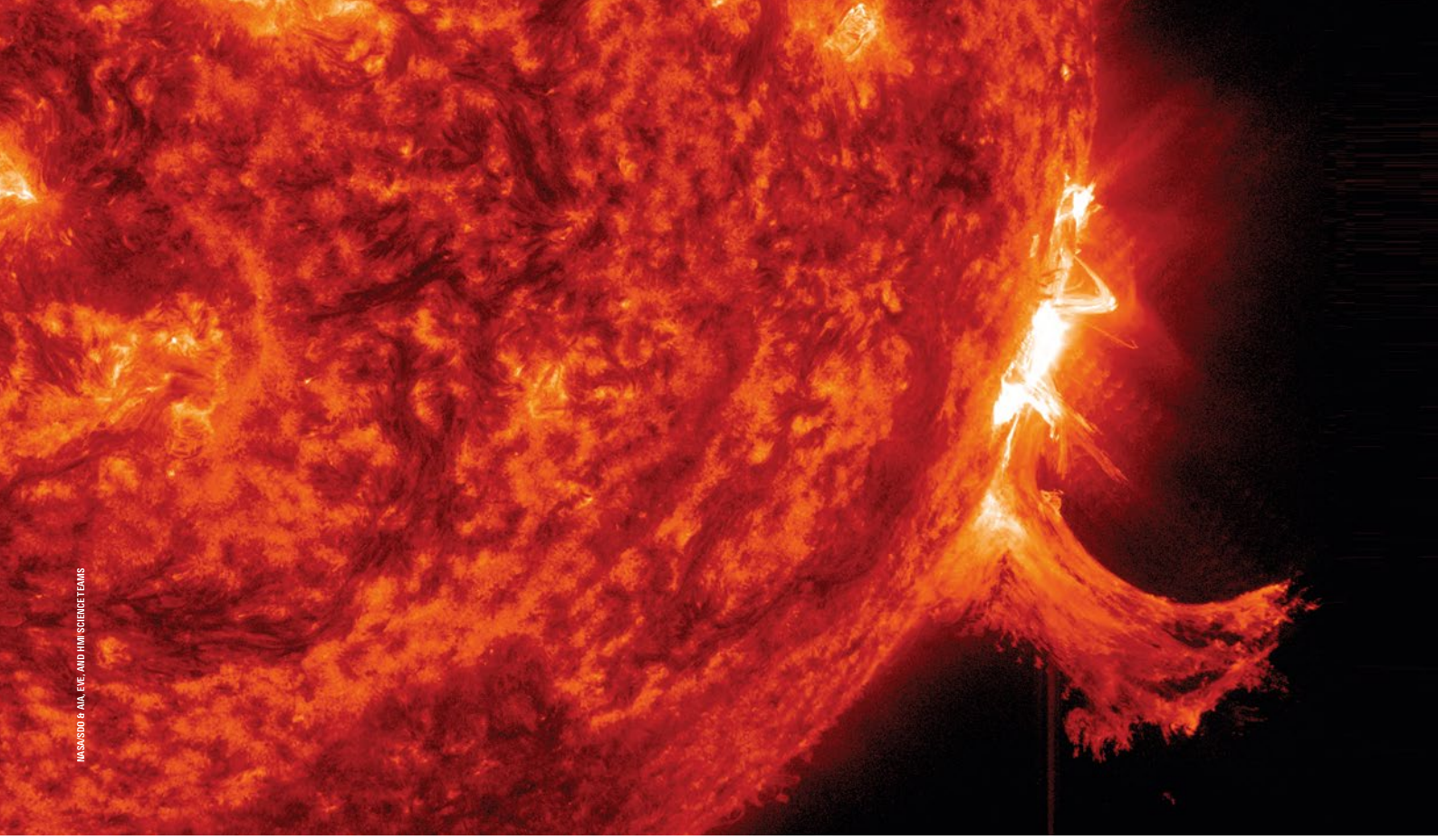
Mit der Untersuchung eines dieser Isotope, Aluminium-26, verfolgten Matthieu Gounelle vom französischen Nationalmuseum für Naturgeschichte und Georges Meynet von der Sternwarte Genf den Stammbaum der Sonne über drei Generationen hinweg. Aluminium-26 besitzt eine Halbwertszeit von rund einer Million Jahren, das heißt, innerhalb dieser Zeit ist die Hälfte radioaktiv zerfallen. Das Isotop findet sich in den Meteoriten aus der Frühzeit des Sonnensystems und stammt nach Ansicht vieler Astronomen von einer Supernova, die noch während der Entstehung der Sonne in der Nachbarschaft explodierte. Doch ein solches Ereignis in unmittelbarer zeitlicher und räumlicher Nähe wäre ein ungewöhnlicher Zufall.

Gounelle und Meynet zeigten 2012, dass das Aluminium-26 stattdessen auch aus dem Inneren eines massereichen Sterns stammen könnte. Dieser Himmelskörper wäre laut den Berechnungen der Forscher mit etwa der 30-fachen Masse der Sonne der größte in der kosmischen Nachbarschaft gewesen. Wie vergleichbare Sternriesen hätte er ein kurzes, aber spektakuläres Leben gehabt und wäre schon wenige Millionen Jahre nach seiner Geburt explodiert.

Dabei hätte er nicht nur Aluminium-26 freigesetzt, sondern im Verlauf der Supernova auch Wasserstoff, schwere Metalle und radioaktive Elemente in die Gaswolke getrieben, aus der unser Sonnensystem vielleicht entstanden ist. Die Forscher taufte den hypothetischen

AUF EINEN BLICK FAMILIENGESCHICHTEN IN DER MILCHSTRASSE

- 1** Astronomen erfahren mehr über den Ursprung unseres Sonnensystems, indem sie die Verteilungen bestimmter Elemente im All vermessen und die Bewegungen anderer Sterne untersuchen.
- 2** Die Forscher ermitteln beispielsweise, wie das Material vergangener Sternengenerationen in einstmaligen benachbarten Objekten aufgegangen ist, und erstellen Stammbäume wie in der Biologie.
- 3** Ein Stern, der wohl mit der Sonne entstanden ist, ließ sich bereits identifizieren. Hinweise auf weitere Geschwister könnten sich in den Datensätzen hochpräziser Himmelsdurchmusterungen verbergen.



Im Oktober 2014 schleuderte die Sonne bei einer Eruption große Mengen Plasma ins All. Solche Ausbrüche kommen immer wieder vor – die kräftigsten unter ihnen setzen noch zehnmal mehr Energie frei.

Riesenstern Coatlicue, nach der Mutter der Sonne in der Mythologie der Azteken.

Spätere Untersuchungen haben weitere Hinweise darauf geliefert, wie und über welche Zeiträume die Bausteine des Sonnensystems zusammengefunden haben. 2014 berechneten beispielsweise australische Wissenschaftler, dass einige der schweren Metalle wie Gold, Silber und Platin, die auf der Erde und in Meteoriten vorkommen, bereits etwa 100 Millionen Jahre und ein Teil der Seltenen Erden wie Neodym rund 30 Millionen Jahre vor der Geburt der Sonne in unserer kosmischen Nachbarschaft eingetroffen sind.

Um diese mögliche Geschichte unseres Sonnensystems zu überprüfen, vergleichen Astronomen das Szenario mit der Entstehung anderer Objekte mit ähnlicher chemischer Zusammensetzung. Alles scheint zu passen. Nach Ansicht der Astrophysikerin Megan Bedell vom Flatiron Institute in New York City, die sich auf Planetensysteme in der Milchstraße spezialisiert hat, ist die Sonne »in den Kontext ihrer Nachbarn gestellt ein für solche Entstehungsbedingungen ganz typischer Stern«.

Die Wissenschaftler spüren nicht nur den direkten Vorfahren der Sonne nach. Mit Hilfe von aus der Biologie entlehnten Verfahren halten sie auch nach Cousins, Onkeln und anderen Verwandten Ausschau – sie erforschen sozusagen den ganzen Familienstammbaum. Ein

Botaniker kann die DNA oder vererbte Eigenschaften auf der Suche nach Verwandtschaftsbeziehungen zwischen Pflanzen nutzen. Astronomen verwenden dafür das Verhältnis chemischer Elemente in den Sternen. Didier Fraix-Burnet vom Institut für Planetenforschung und Astrophysik in Grenoble hat die Methode 2001 als einer der Ersten vorgeschlagen. Er bezeichnete sie als Astrokladistik, angelehnt an die Systematik auf der Basis der Evolutionsbiologie. 2017 konstruierten Paula Jofré von der Universidad Diego Portales in Chile und ihre Kollegen mit diesem Verfahren einen stellaren Stammbaum für die Nachbarschaft der Sonne.

Chemie enthüllt stellare Verbindungen

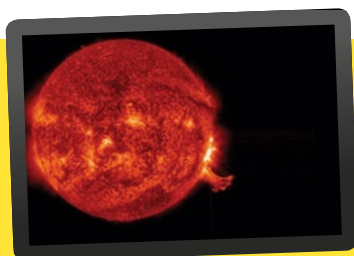
Dabei wendeten Jofré und ihr Team in Zusammenarbeit mit einem Evolutionsbiologen der University of Cambridge die »Distanzmethode« an: ein Verfahren, bei dem unterschiedliche Äste evolutionäre Veränderungen bedeuten. Übertragen auf die Astronomie repräsentieren die Äste Sternpopulationen, die sich bezüglich ihres Alters und ihres Bewegungsmusters unterscheiden.

Zur Veranschaulichung kann man sich zwei Generationen von Sternen vorstellen. Die erste bestand aus einem großen und einem kleinen Exemplar. Der massereichere Stern explodierte früher und führte zur Entstehung eines Sterns der zweiten Generation – ähnlich wie der Tod von Coatlicue zur Geburt der Sonne. »Die zweite Generation enthält Informationen aus der ersten. Sie sind gewissermaßen genetisch miteinander verknüpft«, kommentiert Jofré. »So könnten wir auf einen Stern und seinen Onkel stoßen.« Letzterer wäre in diesem Fall das kleinere, noch nicht explodierte Objekt.

Jofré und ihre Kollegen untersuchten eingehend 21 nahe Sterne, die unserer Sonne ähneln. Dabei konzentrierten sie sich auf 17 chemische Elemente und ordneten die Sterne anhand ihrer Elementhäufigkeiten. So sortierten die Forscher sie in zwei bereits zuvor bekannte Familien ein. Allerdings stießen sie auch auf Exemplare, die zu einer neuen, zuvor unbekanntem dritten Gruppe gehören, die Jofré zufolge immer noch rätselhaft ist.

Nach der Geburt von Coatlicue einige zehn Millionen Jahre vor der Entstehung der Sonne ging es ringsum recht geschäftig zu. Gas kollabierte, und Kernreaktionen zündeten – neue Sterne leuchteten auf. Sie schleuderten Materie und Strahlung in die Umgebung, drückten dort befindliches Gas zusammen und lösten so die Entstehung weiterer Sterne aus. Schätzungen ihrer Gesamtzahl reichen von Hunderten bis zu Zehntausenden. Vermutlich liegt die Wahrheit eher am unteren Ende, berücksichtigt man die recht stabile Anordnung der Planeten. Andere Sterne in der Nähe hätten das Sonnensystem zu sehr gestört.

Obwohl sie im gleichen Umfeld entstanden sind, haben sich die Geschwister der Sonne im Lauf der Zeit von ihr wegbewegt. Einige explodierten, andere entfernten sich wegen kleiner Unterschiede bei der Umlaufgeschwindigkeit um das galaktische Zentrum. Aus ihren gegenwärtigen Positionen lässt sich kaum noch auf den Startpunkt schließen. Keith Hawkins, Astronom an der Columbia University, zieht einen Vergleich: »Das ist ähnlich wie bei meinem Zwillingbruder und mir. Wir wurden gemeinsam geboren, leben heute aber weit voneinander entfernt und tun unterschiedliche Dinge.« Doch Hawkins zufolge erlaubt es die Kosmochemie immerhin, Verbindungen aufzuspüren – etwa über die typischen Verhältnisse bestimmter



NASA/SDO

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Elemente in den Sternen. Ivan Ramírez, heute Professor am Tacoma Community College, machte sich 2014 auf eine solche Suche. Er begann mit rund 30 Kandidaten, die er auf Basis ihrer chemischen Zusammensetzung sowie der Geschwindigkeit und Richtung ihrer Bewegung durch die Milchstraße ausgewählt hatte. Nach weiteren Überprüfungen verkleinerte sich das Feld auf nur noch einen einzigen Stern mit der Bezeichnung HD 162826. Er ist um 15 Prozent massereicher und leuchtet etwas blauer als die Sonne. Heute befindet er sich 110 Lichtjahre entfernt im Sternbild Herkules und lässt sich schon mit einem guten Fernglas aufspüren, oberhalb der Schulter des Herkules, nicht weit von Wega.

Er habe diese Form des Fährtenlesens einerseits aus reiner Neugier begonnen, erzählt Ramírez, andererseits,

um eine Strategie zu testen, die sich auf die gigantische Datenmenge des europäischen Satelliten Gaia anwenden lässt. Gaia misst die Helligkeit und die genaue Position von Sternen am gesamten Himmel. So entsteht die bislang detailreichste dreidimensionale Karte der Milchstraße. Ein im April 2018 veröffentlichtes Datenpaket enthielt hochgenaue Messdaten von mehr als 1,3 Milliarden Sternen.

Ramírez hofft, dass sich mit Gaia vielleicht die Hälfte der Geschwister der Sonne aufspüren lässt. Die Forscher erwarten dadurch Erkenntnisse zur Bewegung der Sonne und ihrer Geburtsumgebung durch die Milchstraße. Die Sonne umkreist das Zentrum der Galaxis mit einer Geschwindigkeit von mehr als 200 Kilometern pro Sekunde und hat es schätzungsweise bereits 20-mal umrundet.

Erhielt die Sonne zusätzlich zu ihren eigenen Planeten noch einen fremden Himmelskörper?

Nicht lange nachdem die Sonne und ihre Geschwister ihr erstes Licht aussendeten, verdichteten sich Staubkörnchen um viele – wenn nicht sogar alle – dieser Sterne zu Planeten. Zumindest in unserem Sonnensystem begann das postwendend: Wie Untersuchungen an Meteoriten zeigen, dauerte es weniger als eine Million Jahre, bis die erste Generation von Asteroiden entstanden war. Angetrieben vor allem durch die Wärme des radioaktiven Zerfalls von Aluminium-26 trennten sich Metalle und Silikatverbindungen im Inneren großer Gesteinskörper in Kern und Mantel. Bald gab es größere Planeten (siehe »Aufbruch in der Kinderstube«, **Spektrum** März 2017, S. 44). Der Mars könnte sich innerhalb von zwei Millionen Jahren gebildet haben, die Erde zwischen 38 und 120 Millionen Jahre nach der Geburt der Sonne.

Etwa zu dieser Zeit hat die Sonne eventuell sogar einen Planeten von einem ihrer Geschwister aufgelesen. Der mutmaßliche »Planet Neun«, ein theoretisch vorhergesagter großer Körper weit draußen im Sonnensystem, wäre dann eine Art Cousin der anderen Planeten, den die Sonne 100 Millionen Jahre nach ihrer Geburt adoptiert hat. Für ein solches Szenario müsste Planet Neun seinen Ursprungsstern in einer weiten Bahn umkreisen, in 100 bis 500 Astronomischen Einheiten, das heißt der 100- bis 500-fachen Entfernung von Erde und Sonne. Der zugehörige Stern sollte in einem Abstand von zirka 1500 Astronomischen Einheiten an der Sonne vorbeigeflogen sein.

Solche stellaren Begegnungen sind in Sternhaufen durchaus üblich, und Astronomen halten den Vorgang auch bei unserer Sonne für möglich. Sie hatte bei Planet Neun eine ganze Reihe von Gelegenheiten dazu, ermittelten 2016 Alexander Mustill und Melvyn Davies von der Universität Lund in Schweden gemeinsam mit ihrem Kollegen Sean Raymond von der Universität de Bordeaux in Frankreich. Das hätte sogar vor sich gehen können, ohne dabei den Kuipergürtel zu stören, einen Ring von Kometen und Asteroiden im äußeren Sonnensystem.

Weitere Untersuchungen der dortigen Objekte dürften den Forschern Informationen über die Herkunft von Planet Neun liefern – wenn es ihn denn gibt. Denkbar sind darü-

ber hinaus sogar weitere Überläufer. Wie Eric Mamajek von der University of Rochester und seine Kollegen 2015 zeigten, durchquerte vor rund 70000 Jahren der heute etwa 20 Lichtjahre entfernte, auch Scholz' Stern genannte Himmelskörper WISE 0720-0846 die Oortsche Wolke in unserem Sonnensystem. Dabei handelt es sich um eisige Planetesimale, die weit jenseits der Plutobahn die Sonne umkreisen. Die enge Begegnung mit weniger als einem Lichtjahr Abstand beeinflusste die Umlaufbahnen einiger Objekte in der Oortschen Wolke, wie Carlos de la Fuente Marcos von der Universidad Complutense Madrid 2018 zeigte. Und die Astronomen wissen inzwischen, dass auch kleinere Objekte unserem Sonnensystem einen Besuch abstatten, wie beispielsweise der interstellare Asteroid 1I/Oumuamua im Herbst 2017.

Während sich die Planeten um die Sonne bildeten, veränderte sich das Zentralgestirn. Megan Bedell erforscht schon länger den Zusammenhang zwischen dem chemi-

schen Fingerabdruck von Sternen und der Planetenentstehung. Dabei untersucht sie solare Zwillinge, die nicht unbedingt aus derselben Familie stammen müssen, aber die gleiche chemische Zusammensetzung aufweisen. Die Sonne ist in einer entscheidenden Hinsicht ungewöhnlich. Sie besitzt in ihren Außenschichten weniger schwere Elemente, der Unterschied liegt bei wenigen Erdmassen. Eine mögliche Interpretation des Befunds ist laut Bedell, dass die Materie »in den terrestrischen Planeten und den Kernen der Gasriesen gebunden ist und deshalb in den Außenbereichen der Sonne fehlt«. Der Zusammenhang könnte einen neuen Ansatz für die Suche nach Exoplaneten bieten: Enthält ein sonnenähnlicher Stern etwas weniger schwere Elemente, wird er vielleicht von einem Planetensystem mit vergleichbarer Architektur wie der von unserem umkreist.

In etwa fünf Milliarden Jahren hat die Sonne den Wasserstoffvorrat in ihrem Kern verbraucht. Daraufhin wird sie

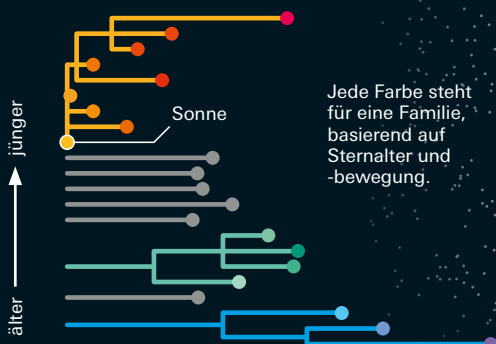
KATIE PECK, NACH JOFRÉ, P. ET AL.: COSMIC PHYLOGENY: RECONSTRUCTING THE CHEMICAL HISTORY OF THE SOLAR NEIGHBOURHOOD WITH AN EVOLUTIONARY TREE. IN: MNRAS 467, S. 2-26, 2017 UND NACH: HIPPARCOS CATALOGUE, ESA 1997 / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Familienbände

Astronomen entwickelten in Anlehnung an die Biologie einen Stammbaum für unsere Region der Galaxis. Sie betrachteten 21 Sterne, die unserer Sonne im Hinblick auf Farbe und Helligkeit ähneln, und analysierten chemische Gemeinsamkeiten. So ergründeten die Wissenschaftler die verwandtschaftlichen Beziehungen und fanden drei deutlich unterscheidbare Familiengruppen. Jede von ihnen hat möglicherweise unterschiedliche Vorfahren, deren Tod den Weltraum mit Materie für die nächste Generation anreicherte. Die Gruppe der Sonne ist in Gelb und Rot dargestellt. Graue Sterne lassen sich keiner der Familien zuordnen.

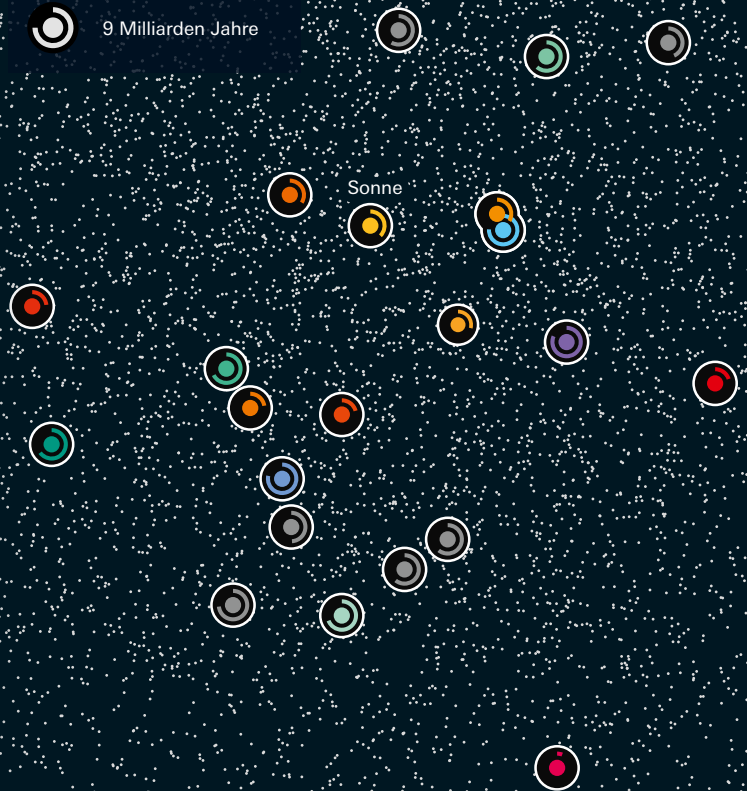
Stammbaum laut chemischer Ähnlichkeit

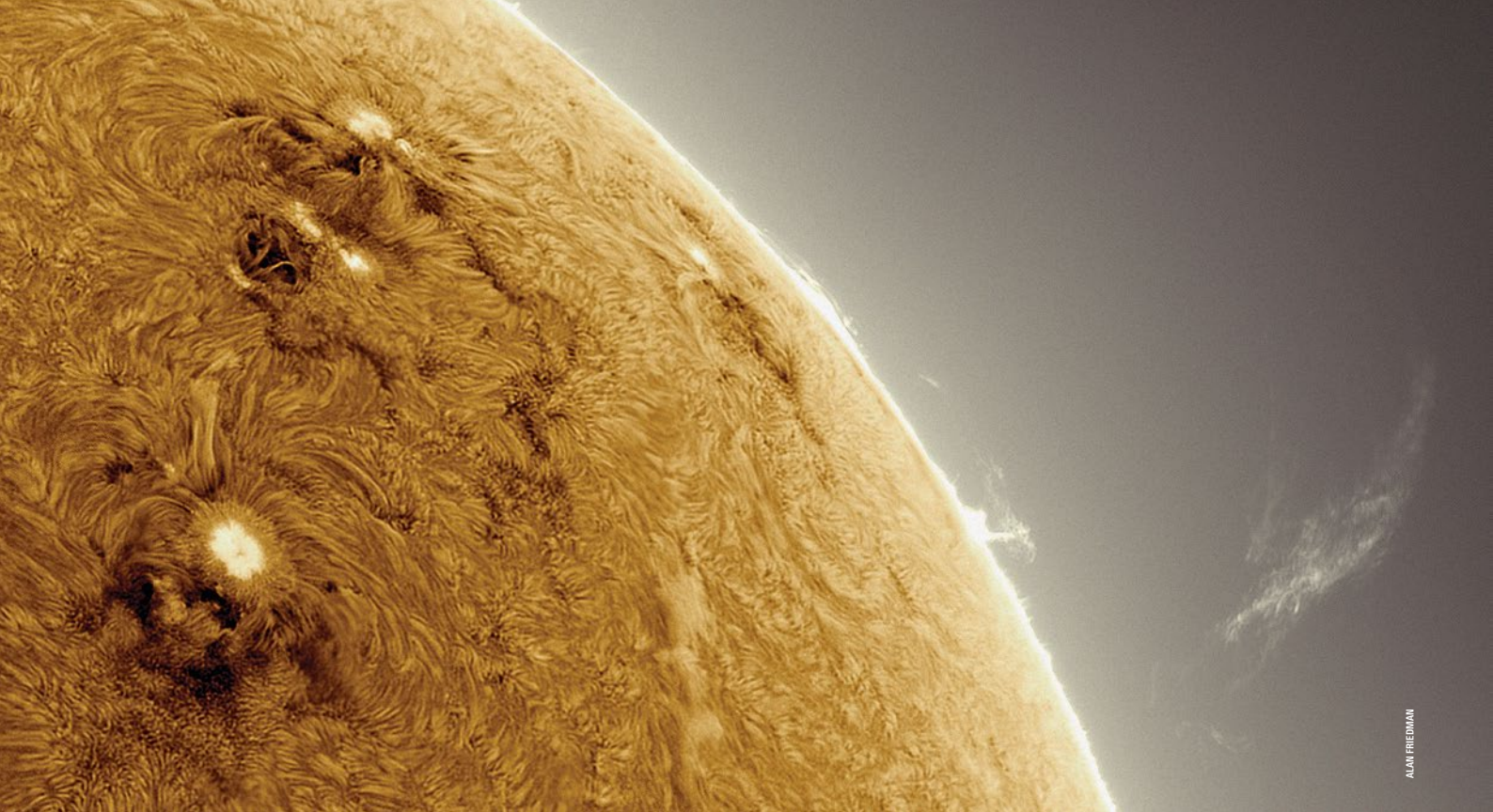
mehr Übereinstimmungen → weniger Übereinstimmungen



Die dargestellten Positionen entsprechen einem Blick von oben auf die Ebene der Milchstraße.

Der Bogen um die Sterne zeigt ihr Alter:





ALAN FRIEDMAN

Auf der Sonnenoberfläche bilden sich in aktiven Regionen mit stark verdrehten Magnetfeldern Sonnenflecken (auf dieser Aufnahme erscheinen sie weiß). In den größten dieser Flecken würde die Erde mehrmals hineinpassen. Rechts unten im Bild ist eine abgelöste Protuberanz zu sehen.

sich zu einem Roten Riesen aufblähen und Merkur sowie Venus verschlingen. Die Erde zieht dann wahrscheinlich sehr nahe über der Oberfläche ihre Bahn oder verschwindet ebenfalls darin. Der Kern der Sonne wird sich abkühlen, weil der nukleare Ofen langsam verglimmt. Die Anziehungskraft reicht nicht aus, um die aufgeblähten, diffusen Außenschichten zu halten, und die Atmosphäre der Sonne entweicht ins All. »Die Sonne wird zu einem dieser wunderschönen Planetarischen Nebel mit einem Weißen Zwerg im Zentrum«, sagt Hawkins. Dieser kleine, dichte Sternrest kühlt im Lauf der Zeit ab und zieht für Äonen weiter seine Bahn durch die Milchstraße.

Hans Van Winckel und Michaël Hillen von der Katholischen Universität Löwen in Belgien zeigten 2016, dass sonnenähnliche Sterne sogar im Alter noch eine neue Schar Planeten produzieren können. Mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte ESO in Chile entdeckten sie eine heiße Staubscheibe um einen alten, sterbenden Stern, die wie die protoplanetaren Scheiben um junge Exemplare aussieht. Das bedeutet, dass einige Sterne – vielleicht sogar unsere Sonne – eine zweite Chance zur Erschaffung von Planeten erhalten. Allerdings ist ein solches Szenario für ein Doppelsystem wahrscheinlicher.

Die Überreste der Sonne werden sich im interstellaren Medium verteilen. Bedell meint allerdings, das ausgesto-

ßene Material träte wahrscheinlich nicht auf genug anderes, um die Bildung eines neuen Sterns auszulösen. »Es wäre sicher poetischer – im Sinn des ewigen Kreislaufs des Lebens –, würde es zu einem Bestandteil der nächsten Generation«, sagt die Forscherin. Doch die Sonne werde vermutlich in den äußeren Bereichen der Milchstraße »einen stillen Tod sterben« und nur wenige Spuren hinterlassen, die von ihrem abenteuerlichen Leben künden.

Noch sind wir da. Alles, was wir über die Sonne lernen, gilt nicht nur für unsere Ecke des Kosmos, sondern erleichtert uns den Zugang zu den vielen Systemen, die wir nicht aus der Nähe untersuchen können. »Ich habe Leute schon sagen hören, Sterne seien im Prinzip ein gelöstes Problem«, kommentiert Bedell. »Es gibt jedoch noch vieles, was wir nicht verstehen.« Unsere Sonne hilft uns, das langsam, aber sicher zu ändern. ◀

QUELLEN

- Bedell, M. et al.:** The Chemical Homogeneity of Sun-Like Stars in the Solar Neighborhood. In: arXiv, 1802.02576, 2018
- De la Fuente Marcos, C. et al.:** Where the Solar System Meets the Solar Neighbourhood: Patterns in the Distribution of Radiants of Observed Hyperbolic Minor Bodies. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters 476, S. L1–L5, 2018
- Gounelle, M., Meynet, G.:** Solar System Genealogy Revealed by Extinct Short-Lived Radionuclides in Meteorites. In: Astronomy & Astrophysics 545, A4, 2012
- Jofré, P. et al.:** Cosmic Phylogeny: Reconstructing the Chemical History of the Solar Neighbourhood with an Evolutionary Tree. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 467, S. 1140–1153, 2017
- Ramírez, I. et al.:** Elemental Abundances of Solar Sibling Candidates. In: Astrophysical Journal 787, 154, 2014



FRANZISKA SCHÄDEL (WWW.FLORIAN-FREISTETTER.DE/BUCHER/HTML/
CC-BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/SY-SA/4.0/LEGAL/0000))

FREISTETTERS FORMELWELT ES KOMMT DOCH AUF DIE GRÖSSE AN!

Warum werden Teleskope immer gigantischer? Der Grund ist keineswegs Größenwahn, sondern das Airy-Scheibchen. Das soll nämlich möglichst klein sein.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

» spektrum.de/artikel/1603756

In der Astronomie werden Teleskope so gut wie nie dafür eingesetzt, Dinge vergrößert abzubilden, im Unterschied zum Fernglas für den Hausgebrauch.

Die meisten Himmelskörper sind so weit entfernt, dass das überhaupt keinen Effekt hat. Man braucht Teleskope einerseits, um möglichst viel Licht zu sammeln und so Objekte sichtbar zu machen, die für das bloße Auge zu schwach leuchten. Andererseits geht es auch darum, die Dinge möglichst scharf zu sehen. Letzteres lässt sich in folgende Formel fassen:

$$\sin \theta \approx 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Sie gibt näherungsweise den Winkeldurchmesser θ des zentralen »Airy-Scheibchens« an. Trifft Licht mit einer Wellenlänge λ auf eine kreisförmige Blende des Durchmessers D , wird es daran gebeugt. Im Zentrum kann man dann ein Maximum der Lichtintensität sehen, das von nach außen hin immer schwächeren Ringen umgeben ist. Der runde Lichtfleck im Zentrum ist der, dessen Durchmesser die Formel beschreibt und der den Astronomen das Leben schwer macht.

Dass ein Lichtstrahl nicht exakt punktförmig abgebildet wird, liegt nicht an irgendwelchen technischen Problemen. Selbst wenn das Licht auf ein optisch perfektes Instrument ohne Abbildungsfehler träfe, würde es an der Blende trotzdem gebeugt. Der Fleck ist nach dem englischen Astronomen George Biddell Airy benannt, der sich im 19. Jahrhundert mit diesem Phänomen beschäftigt hat. Und die Bezeichnung »Scheibchen« demonstriert das Problem der Astronomen: Eben weil es eine Scheibe ist und kein Punkt, ist jedes Bild, das mit einem Teleskop gemacht wird, ein wenig unscharf.

Will man das Auflösungsvermögen, also die Bildschärfe erhöhen, dann muss das Airy-Scheibchen möglichst klein werden. Und wie die Formel deutlich zeigt, gibt es dafür genau zwei Möglichkeiten: Entweder

man verkleinert die Wellenlänge des Lichts; oder man vergrößert den Durchmesser der Blende.

Bei der Wellenlänge haben die Astronomen oft keine Wahl. Vom Erdboden aus können wir nur das sichtbare Licht beobachten, dazu ein wenig Infrarotstrahlung und Radiowellen. Den Rest der elektromagnetischen Strahlung lässt die Erdatmosphäre nicht durch. Um das Auflösungsvermögen eines Teleskops zu verbessern, muss man es also so groß wie möglich bauen. Das gilt umso mehr, wenn es sich nicht um ein optisches Teleskop, sondern um ein Radioteleskop handelt. Die Wellenlänge der Radiostrahlung ist nämlich viel größer als die des sichtbaren Lichts. Es braucht daher riesige Teleskope, um ein gutes Auflösungsvermögen zu erhalten.

Zum Glück ist es leichter, große Radioempfänger zu bauen als optische Spiegel. In China wurde im Jahr 2016 das 520 Meter große Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) fertig gestellt. Das weltgrößte optische Teleskop ist derzeit noch im Bau: Das Extremely Large Telescope (ELT) der Europäischen Südsternwarte wird einen Spiegel mit 39 Meter Durchmesser haben.

Sein Auflösungsvermögen wird so groß sein, dass man von der Erde aus auf dem Mond etwa zehn Meter große Details erkennen kann. Was übrigens nicht ausreicht, um die Hinterlassenschaft der bemannten Mondlandung der NASA zu erkennen. Dafür bräuchte es ein noch schärferes Teleskop, das – wie sich mit der Formel berechnen lässt – mindestens 200 Meter groß sein müsste.

Ebenso einfach kann man berechnen, dass man – entgegen dem weit verbreiteten Mythos – vom Mond aus keinesfalls mit bloßem Auge die Chinesische Mauer sehen kann. Unser Auge mit seiner winzigen Pupille hat eine viel zu geringe Auflösung, weshalb wir Astronomen eben die gigantischen Teleskope so dringend brauchen.

MEDIEN KLICKS, LÜGEN UND VIDEO

Womöglich vertrauen wir bald keiner Nachricht mehr. Denn künstliche Intelligenz ermöglicht es inzwischen jedem, täuschend echte Film- und Tonsequenzen zu erzeugen.

Man verwandelt ein Gesicht in ein anderes, indem man beide mit einem gedachten Gitternetz überzieht und korrespondierende Punkte aufeinander abbildet. Mit diesem »motion capturing« kann man insbesondere die Mundbewegungen einer Person einer anderen aufprägen.



Brooke Borel ist Journalistin und Autorin des Buchs »The Chicago Guide to Fact-Checking«. Sie ist kürzlich im »Fact-checking« gegen eine künstliche Intelligenz angetreten und hat mit einem Besorgnis erregenden Vorsprung gewonnen.

» spektrum.de/artikel/1603758



SPENCER_WHALEN / GETTY IMAGES / ISTOCK

► Im April 2018 erschien ein neues Video von Barack Obama im Internet. Er sieht aus wie bei jeder seiner Reden: blütenweißes Hemd, dunkler Anzug mit einer Flaggennadel am Revers, im Hintergrund die amerikanische und die Präsidentschaftsflagge. Obama blickt in die Kamera und spricht mit ausdrucksvollen Handbewegungen die Worte: »Präsident Trump ist ein totaler Volltrottel.«

Ohne auch nur zu zwinkern, fährt er fort: »Nun, sehen Sie, ich würde so etwas nie sagen. Jedenfalls nicht in einer öffentlichen Rede. Aber jemand anderes würde es tun« – woraufhin der Schauspieler Jordan Peele in der rechten Hälfte des Bildes auftaucht.

Obama hatte nichts dergleichen gesagt; eine Aufzeichnung einer echten Rede war so manipuliert worden, dass seine Mund- und Handbewegungen denen Peeles folgen. Seite an Seite sieht man die beiden sprechen, während Peele als gleichsam digitaler Bauchredner Obama die Worte in den Mund legt (Bild S. 74 unten).

Produziert hat dieses – inzwischen millionenfach angeklickte – Video das Medienunternehmen BuzzFeed News auf eigene Kosten als Demonstration einer neuen Technik aus der künstlichen Intelligenz (KI). Mittlerweile kann die Software für Ton und bewegte Bilder nämlich dasselbe tun wie Photoshop für gewöhnliche Bilder: die Realität täuschend echt verfälschen.

Noch sind die Ergebnisse verbesserungsfähig. Obamas Stimme klingt ein bisschen näselnd, und wer genau hinschaut, sieht seinen Mund für kurze Momente zur Seite verrutschen. Aber das wird sich geben. Die ursprünglich für Kinofilme und Videospiele entwickelte Technik macht große Fortschritte und lässt inzwischen bei Sicherheitsexperten und Medienwissenschaftlern die schwärzesten Fantasien aufkommen. Aller Wahrscheinlichkeit nach wird die nächste Generation dieser Softwarewerkzeuge sich nicht mehr auf die Manipulation vorhandenen Materials beschränken, wie bei der beschriebenen Obama-Ansprache, sondern von Grund auf neue Szenen erschaffen können, die in Wirklichkeit nie stattgefunden haben – nicht einmal annähernd.

Die Folgen für den gesellschaftlichen Diskurs wären verheerend. Man stelle sich vor, dass in einem Kopf-an-Kopf-Rennen zweier Kandidaten kurz vor dem Wahltag ein Video auftaucht, das den Ruf eines von ihnen beschädigt. Oder ein Film, der kurz vor dem Börsengang einer großen Firma deren Vorstandschef in ein schlechtes Licht rückt. Eine Gruppe könnte einen islamistischen Terroranschlag inszenieren, mit gefaktem Bildmaterial Nachrichtenagenturen und Blogger hinter Licht führen und dadurch Vergeltungsaktionen provozieren.

Auch wenn sich ein solches Video später als Fälschung erweist, wird die Öffentlichkeit am Ende trotzdem die Geschichte dahinter für wahr halten? Und vielleicht am beunruhigendsten: Werden wir unter der Masse der Fälschungen gar nicht mehr glauben, was wir sehen und hören – auch die Wahrheit nicht?

Viele Fachleute erkennen an, dass ihre technischen Entwicklungen Gelegenheit zu weit reichendem Missbrauch geben. Aber während sie sich »für Verfahren zur Erkennung und Offenlegung von Fälschungen begeistern, denken sie kaum darüber nach, inwieweit ihre Bemühungen die Überzeugungen der Konsumenten beeinflussen können«, sagt Nathaniel (»Nate«) Persily, Professor für Rechtswissenschaft an der Stanford University. Persily untersucht unter anderem, wie das Internet die Demokratie beeinflusst, und vertritt gemeinsam mit einer wachsenden Gruppe von Forschern die Überzeugung, dass die Eindämmung sich rasch verbreitender Fehlinformationen weit mehr erfordert als technische Lösungen. Vielmehr müsse man Psychologen, Sozialwissenschaftler und Medienexperten zu Rate ziehen, um die Wirkungen der Technik auf die Menschen zu erforschen.

AUF EINEN BLICK DIE STUNDE DER WAHRHEIT

- 1 Mit Hilfe der künstlichen Intelligenz lassen sich sehr einfach täuschend echte Videosequenzen erstellen. Das bedroht die Glaubwürdigkeit der Medien und das Vertrauen in demokratische Institutionen allgemein.
- 2 Gefälschte Videos sind besonders geeignet, Angst zu erregen – die wiederum die Nutzer veranlasst, die Falschmeldung umso bereitwilliger weiterzuverbreiten.
- 3 Algorithmen zum automatischen Erkennen gefälschter Videos sind in der Entwicklung; aber selbst wenn sie funktionieren, wird die Entlarvung von Fake News ihrer Verbreitung stets hinterherhinken.

»Und das müssen wir jetzt tun«, sagt Persily, »denn im Moment führen die Techniker – zwangsläufig – die Diskussion darüber an«, welche Arten von Videos die künstliche Intelligenz möglich macht. Derweil bröckelt das Vertrauen in demokratische Institutionen wie Regierung und Presse. Dass die Leute mittlerweile ihre Informationen vorrangig über die sozialen Medien beziehen, macht das Geschäft der Fälscher noch einfacher. Und da bislang niemand einer immer raffinierteren Technik eine durchdachte Strategie entgegensetzen hat, ist unser ohnehin brüchiges Vertrauen in die klassischen Institutionen erst recht in Gefahr.

Harmlose Anfänge

Die Kunst der digitalen Spezialeffekte entwickelte sich im Kino zunächst mit Sciencefiction-Animationen, die durch kein reales Vorbild gebremst waren. Einen ersten Höhepunkt bildete der 1993 erschienene Film »Jurassic Park«. Ein Jahr später konnte man man bereits altes Material so glaubwürdig manipulieren, dass Forrest Gump John F. Kennedy die Hand schüttelt (Bild S. 74 oben).

Der 2016 erschienene Film »Rogue One« spielt unmittelbar vor der ersten Geschichte der (ersten) »Star Wars«-Trilogie; also mussten die vertrauten Gesichter von Gouverneur Tarkin und Prinzessin Leia auf der Leinwand erscheinen. Da aber der Darsteller Peter Cushing 1994 gestorben war und Carrie Fisher nicht mehr jugendlich genug aussah, ließen sie für deren Rollen andere Schauspieler auftreten und ersetzten mittels »motion capturing« deren Gesichter Bild für Bild durch die altvertrauten.

Anfangs pflegten die Grafiker mit dem Computer dreidimensionale Modelle zu erzeugen und Oberflächenstruktur und andere Details mit der Hand nachzutragen – ein Zeitraubender Prozess, der keine Massenfertigung zulässt. Neue Ideen kamen vor etwa 20 Jahren aus einer anderen Richtung: »Computer vision« (Computersehen) heißt die Kunst, einem Rechner das Erkennen von Gegenständen in Kamerabildern beizubringen. Also muss das Gerät aus den Daten Modelle der Objekte in seiner Umgebung errech-

nen. Da bietet es sich an, diese Modelle gleich weiterzuverwenden, statt sie einzeln von Hand zu fertigen. 1997 entwickelten Wissenschaftler der kurzlebigen, aber äußerst einflussreichen Interval Research Corporation in Palo Alto (Kalifornien) das Programm Video Rewrite, das bestehende Aufnahmen zerlegt und neu zusammenfügt. Die Forscher gestalteten unter anderem einen Video-Clip, in dem John F. Kennedy sagt: »Ich habe Forrest Gump nie getroffen.« Mittlerweile arbeiten sie alle bei Google.

Bald darauf brachten Wissenschaftler aus der Arbeitsgruppe von Heinrich Bülthoff am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen einem Computer bei, Merkmale aus einem Datensatz von 200 dreidimensionalen Scans von menschlichen Gesichtern zu extrahieren und damit neue Gesichter zu gestalten.

Einen gewaltigen Sprung nach vorn machte das Forschungsgebiet um 2012 mit dem Aufkommen einer KI-Technik namens »Deep Learning« (Spektrum Januar 2018, S. 12). Im Gegensatz zu den Anwendungen der späten 1990er Jahre können die »tiefen neuronalen Netze« tatsächlich aus neuen Daten lernen und dadurch immer besser werden. Außerdem erübrigt sich die Notwendigkeit, überhaupt Modelle zu erstellen. »Dies ist der Moment, in dem Ingenieure sagen: Wir modellieren keine Dinge mehr«, sagt Xiaochang Li, Postdotorandin am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin. »Wir modellieren unser Unwissen über die Dinge und lassen dann das System einfach laufen, um Muster zu finden.«

Man bringt einem tiefen neuronalen Netz bei, zum Beispiel menschliche Gesichter zu erkennen, indem man ihm Hunderte bis Tausende von Fotos vorlegt und jedem Bild die Information mitgibt, ob es sich um ein Gesicht handelt oder nicht. Bei diesem Lernprozess legt das Netz sich die Merkmale zu, die ein menschliches Gesicht ausmachen – allerdings ohne dass diese Merkmale irgendwie beschreibbar wären. Dennoch kann das Netz, sowie es ein neues Bild erblickt, errechnen, in welchem Ausmaß die Merkmale vorliegen, und daraufhin die Entscheidung treffen »Dies ist ein Gesicht« – oder eben nicht.

Der nächste Schritt ist der von der Analyse zur Synthese. Auch ein so genanntes generatives Netz wird mit Tausenden von Bildern trainiert; aber nun nutzt es die so erworbenen Merkmale, um neue, echt wirkende Gesichter zu erzeugen.

Einige Unternehmen verwenden inzwischen den gleichen Ansatz für Ton- an Stelle von Bildaufnahmen. Anfang 2018 stellte Google ein KI-Assistenzprogramm namens Duplex vor, das auf der Software WaveNet basiert. Duplex klingt am Telefon wie ein echter Mensch – inklusive Verlegenheitslauten wie »äh« und »hm«. In Zukunft wäre also Jordan Peele als Sprecher für ein gefälschtes Obama-Video entbehrlich. Im April 2017 veröffentlichte das kanadische Startup-Unternehmen Lyrebird künstlich erzeugte Au-



OBEIN: STANDBILD AUS FORREST GUMP, PARAMOUNT PICTURES, 1994 / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2018;
UNTEIN: STANDBILD AUS YOU WON'T BELIEVE WHAT OBAMA SAYS IN THIS VIDEO, MONKEYPAW PRODUCTIONS AND BUZZFEED, 17.04.2018 (WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?v=C0546DM1E0)



Der fiktive Forrest Gump ist dem echten John F. Kennedy nie begegnet; vielmehr wurde das Gesicht des Schauspielers in historische Filmaufnahmen einmontiert (oben). Heute erfordert es keine besondere Kunstfertigkeit mehr, Gesichtsbewegungen einer Person (Jordan Peele, unten rechts) auf eine andere (Barack Obama, links) zu übertragen.

diodateien, die echten Aufnahmen von Obama, Trump und Hillary Clinton erschreckend ähnlich klingen.

Generative Netzwerke benötigen große Datenmengen für das Training und entsprechend viel menschliche Arbeit für die Bereitstellung des Trainingsmaterials. Also versucht man, auch diesen Teil der Arbeit an die Maschine zu delegieren: Das Netz trainiert sich selbst.

Im Jahr 2014 entwickelten Ian Goodfellow und seine Kollegen an der Université de Montréal (Kanada) ein Paar aus gegnerischen generativen Netzen (generative adversarial networks, GAN). Das eine Netz, der »Generator«, erzeugt gefälschte Bilder, und das zweite, der »Diskriminator«, lernt, zwischen echt und falsch zu unterscheiden. Mit einem Minimum an menschlichen Eingriffen trainieren sich die Netzwerke gegenseitig, indem sie gegeneinander ausgespielt werden: Der Generator bekommt als Lernziel, dass sein Produkt vom Diskriminator als echt deklariert wird, und der Diskriminator, dass er echte und gefälschte Bilder als

solche erkennt. Jedes Mal, wenn der Diskriminator ein Erzeugnis des Generators als Fälschung enttarnt, verändert der Generator sein Bild, so dass es überzeugender wirkt, und jedes Mal, wenn es dem Generator gelingt, den Diskriminator zu täuschen, bessert dieser seine Kriterien nach.

GANs können alles Mögliche generieren. An der University of California in Berkeley bauten Jun-Yan Zhu und seine Kollegen ein Paar von Netzen, das Pferde auf Fotos in Zebras oder ein impressionistisches Gemälde von Monet in eine scharfe, fotorealistische Szene verwandeln kann.

Im Mai 2018 brachten Forscher des Max-Planck-Instituts für Informatik in Saarbrücken und ihre Kollegen das Programm »Deep Video« heraus, das ebenfalls ein GAN verwendet. Mit seiner Hilfe kann ein Schauspieler einer anderen Person in voraufgezeichnetem Filmmaterial seine Mund-, Augen- und Gesichtsbewegungen aufprägen, so wie Jordan Peele das mit Obama gemacht hat. Deep Video funktioniert bislang nur, wenn das »Opfer« frontal in die Kamera schaut. Bewegt sich der Schauspieler zu sehr, weist das resultierende Video auffällige Artefakte auf; zum Beispiel verschwimmt die Umgebung des Gesichts.

Noch können GANs eine detailreiche Szene nicht aus dem Hut zaubern, ohne dass der Unterschied zu einer echten Aufnahme auffällt. Manchmal produzieren sie Abstrusitäten wie ein Auge, das einem Menschen aus der Stirn wächst. Im Februar 2018 gelang es jedoch Forschern der Firma NVIDIA, mit einem GAN unglaublich hochaufgelöste Gesichter zu produzieren, indem sie das Training mit relativ kleinen Fotos begannen und dann die Auflösung Schritt für Schritt erhöhten. Und Hao Li, Assistenzprofessor für Informatik an der University of Southern California und Chef von Pinscreen, einer Startup-Firma für »angereicherte Wirklichkeit« (augmented reality), hat mit Hilfe von GANs realistische Bilder von notorisch schwierigen Körperpartien erschaffen: Haut, Zähne und Münder.

Keine dieser Technologien ist für Laien einfach zu bedienen. Aber das Experiment von BuzzFeed lässt ahnen, wohin die Entwicklung geht. Das eingangs genannte Video stammt von der kostenlosen Software FakeApp, die ihrerseits Deep Learning (ohne GANs) verwendet. Die so erstellten Videos heißen in der Szene Deepfakes nach einem Nutzer der Website Reddit, der sich das Pseudonym »Deepfakes« (zusammengedogen aus »Deep Learning« und »Fake«) zulegte und Aufsehen erregte, weil er nicht nur als einer der Ersten die Technik beherrschte, sondern auch mit ihrer Hilfe die Gesichter der Darsteller in Pornofilmen durch solche von Prominenten ersetzte.

Seitdem haben Amateure unzählige Videos mit Fake-App produziert. Die meisten von ihnen sind relativ harmlose Streiche. Man sieht den Schauspieler Nicolas Cage in zahlreichen Filmen, in denen er nicht mitgespielt hat, oder Trumps Kopf auf dem Körper von Angela Merkel. Bedrohlicher ist, was man mit der Technik anstellen könnte, nachdem im Prinzip jeder sie nutzen kann.

Experten befürchten seit Langem, dass die neuen Manipulationsmöglichkeiten unsere Wahrnehmung der Realität ruinieren könnten. Bereits im Jahr 2000 warnte ein Artikel im »MIT Technology Review«, dass durch Produkte wie Video Rewrite der Augenschein nicht mehr als Verge-

wisserung dienen könne (»seeing is no more believing«). Schließlich könne »ein Bild in den Abendnachrichten durchaus eine Fälschung sein – das Produkt einer schnellen neuen Video-Manipulations-Technologie«.

So schlimm ist es 18 Jahre später noch nicht. Allem Anschein nach sind Fake-Videos in der Tagesschau bislang kein Problem. Eine richtig gute Fälschung ist nämlich immer noch schwierig. Die Leute von BuzzFeed haben für ihr Obama-Video 56 Stunden gebraucht, mit professioneller Unterstützung.

Vor den Präsidentschaftswahlen 2016 hat jeder vierte Amerikaner eine Fake-Nachrichtenseite angeklickt

Allerdings hat sich unser Konsumverhalten, was Informationen angeht, erheblich verändert. Nach einer Untersuchung des Pew Research Center schauen heute nur noch etwa die Hälfte der amerikanischen Erwachsenen die Fernsehnachrichten, während zwei Drittel zumindest einen Teil ihrer Informationen aus den sozialen Medien beziehen. Im Internet haben sich zahlreiche verschworene Gemeinschaften (»Echokammern«) etabliert, die nur noch Meldungen aus der eigenen Gruppe zur Kenntnis nehmen, und Websites, die zur Verfolgung ihrer Ziele vor der Erregung von Wut und Angst nicht zurückschrecken – gegen alle journalistischen Standards (**Spektrum** November 2017, S. 58). Je abenteuerlicher die Meldung, desto viraler ist sie, das heißt, desto schneller verbreitet sie sich übers Netz, sagt Persily. Und die Ungenauigkeiten bei gefälschten Videos fallen auf dem kleinen Handydisplay weniger auf als auf dem häuslichen Fernseher.

Was passiert, wenn ein Deepfake-Video mit einer politisch oder sozial einflussreichen Botschaft viral wird? »Die kurze Antwort lautet: Wir wissen es nicht«, sagt Julie Carpenter, die sich in der Ethics + Emerging Sciences Group an der California State Polytechnic University in San Luis Obispo mit der Interaktion von Menschen und Robotern beschäftigt. Vielleicht wissen wir es schon, wenn dieses Heft erscheint; denn Anfang November fanden in den USA wichtige Halbzeitwahlen (midterm elections) statt.

Einmal haben wir das fatale Zusammenspiel von Desinformation und enger Vernetzung bereits erlebt. Im amerikanischen Präsidentschaftswahlkampf 2016 tauchten zahlreiche Falschmeldungen auf, die darauf angelegt waren, sich viral zu verbreiten. Und sie haben ihre Empfänger erreicht: Nach einer gemeinsamen Untersuchung der Princeton University, des Dartmouth College und der University of Exeter in England hat etwa jeder vierte Amerikaner zwischen dem 7. Oktober und dem 1. November 2016 eine Fake-Nachrichtenseite angeklickt; den meisten wurde sie von Facebook angeboten. Im selben Jahr fiel das öffentliche Vertrauen in den Journalismus auf einen Tiefpunkt. In einer Umfrage schenkten nur 51 Prozent unter den Anhängern der Demokraten und 14 Prozent von denen der Republikaner den Nachrichten der Massenmedien tatsächlich Glauben.

Es gibt nicht viele Untersuchungen über gefälschte Nachrichten. Aber einige deuten darauf hin, dass es schon reicht, eine falsche Informationen nur einmal gesehen zu

haben, um sie später für plausibel zu halten, sagt Gordon Pennycook, Dozent für Organisationsverhalten an der University of Regina in Saskatchewan (Kanada). Wenn wir hören, wie Obama Trump mit einem Schimpfwort belegt, und nach einer Woche auf eine weitere Fälschung treffen, in der Obama gegenüber Trump obszön wird, neigen wir dazu, das schon deshalb für echt zu halten, weil uns das Muster vertraut ist.

Laut einer Studie aus dem Massachusetts Institute of Technology (MIT), die zwischen 2006 und 2017 insgesamt 126 000 verschiedene Storys auf Twitter verfolgte, teilen wir falsche Nachrichten bereitwilliger als echte; und politische Fälschmeldungen verbreiten sich weiter und rascher als die über Geld, Naturkatastrophen oder Terrorismus. Die Autoren der im März 2018 in »Science« erschienenen Arbeit vermuten, dass die Menschen nach Neuheiten gieren. Allgemein zielen gefälschte Nachrichten auf unsere Emotionen und veranlassen uns dadurch, sie weiterzuleiten, bevor wir die Information wirklich verarbeitet haben und entscheiden können, ob eine Verbreitung sich lohnt. Je mehr ein Inhalt uns überrascht, erschreckt oder empört, desto schneller und häufiger scheinen wir bereit, ihn zu teilen.

Allem Anschein nach ist die Darreichungsform Video besonders geeignet, Angst zu schüren. »Wenn Sie Informationen visuell verarbeiten, glauben Sie, dass die Sache Ihnen räumlich, zeitlich oder sozial nähersteht«, sagt Elinor Amit, Assistenzprofessorin für Kognitionswissenschaft, Linguistik und Psychologie an der Brown University. Ihre Arbeit beschäftigt sich mit den Unterschieden in unseren Reaktionen auf Texte und Bilder. Amit vermutet evolutionäre Ursachen: Unsere Sehfähigkeit ist älter als die Sprache, und in – echten oder vermuteten – Gefahrensituationen geben wir den unmittelbaren Sinneseindrücken den Vorrang.

Gefälschte Videos haben in der Tat bereits in politische Kampagnen eingegriffen. Im Juli 2018 veröffentlichte Allie Beth Stuckey, eine Moderatorin des Medienunternehmens Conservative Review, auf Facebook ein Interview mit Alexandria Ocasio-Cortez, einer demokratischen Kandidatin für den Kongress aus New York City. Das Video war kein Deepfake, sondern ganz traditionell zusammengeschnitten aus einem echten Interview und veränderten Fragen, die nicht zu den Antworten passten, so dass die Befragte wirkte, als sei sie nicht recht bei Verstand. Das mag man je nach der eigenen politischen Orientierung als Verleumdung auffassen oder als Satire, wie Stuckey später zu ihrer Verteidigung behauptete. Jedenfalls brachte es das Video auf 3,4 Millionen Aufrufe innerhalb einer Woche. Etliche der mehr als 5000 Kommentare ließen erkennen, dass die Zuschauer es für echt und die Kandidatin damit für dumm gehalten hatten.

Schlimmer als die Fake-Videos selbst sind deren Folgen für den gesellschaftlichen Diskurs. Jeder Politiker, der bei einer Missetat gefilmt wird, kann Zweifel säen mit der Behauptung, das Video sei gefälscht. Bereits das Wissen, dass glaubwürdige Fälschungen möglich sind, kann das Vertrauen in alle Medien untergraben, sagt Raymond J. Pingree, Assistenzprofessor für Massenkommunikation an

»Wir können das Spiel nicht gewinnen. Wir können es den Bösen nur immer schwerer machen«

der Louisiana State University. Pingree untersucht, inwieweit Menschen sich fähig fühlen, Echtes von Falschem zu unterscheiden, und wie das ihre Bereitschaft beeinflusst, am politischen Leben teilzunehmen. Wer diese Selbstsicherheit verliert, »fällt eher auf Lügner und Kriminelle herein«, sagt er, »und im Extremfall gibt er die Suche nach der Wahrheit auf«.

Katz-und-Maus-Spiel zwischen Fälschern und Entlarvern

Für einen Computerwissenschaftler besteht die Behebung eines Defekts häufig aus noch mehr Computerwissenschaft. Das aktuelle Problem ist zwar alles andere als ein Programmierfehler und vor allem viel komplizierter; dennoch hält sich in der Szene die Vorstellung, man könne Algorithmen entwerfen, die Fälschungen erkennen und mit Warnhinweisen versehen.

»Man kann sicherlich gewisse Techniken gegen das Problem anwenden«, sagt R. David Edelman von der Internet Policy Research Initiative des MIT. Edelman, früher Berater von Präsident Obama, ist beeindruckt von den gefälschten Videos über seinen ehemaligen Chef. »Ich kenne den Mann. Ich habe Reden für ihn geschrieben. Und ich könnte ein echtes Video nicht von einem falschen unterscheiden.« Aber im Gegensatz zu ihm würde ein Algorithmus digitale Merkmale finden, die mit bloßem Auge nicht zu sehen sind.

Bisherige Lösungen sind von zweierlei Art. Man könnte erstens jedem Video einen Echtheitsnachweis mitgeben, vergleichbar den Hologrammen, Wasserzeichen und anderen Mitteln, mit denen Banknoten gegen Fälschungen gesichert sind. Jede Digitalkamera hätte eine eindeutige Signatur, die – theoretisch – schwer zu kopieren wäre.

Zweitens könnte man in der Tat ein Programm schreiben, das ein gefälschtes Video automatisch als solches erkennt. Das bisher wohl bedeutendste Unternehmen in dieser Richtung heißt Media Forensics oder kurz MediFor. Die Forschungsabteilung des amerikanischen Verteidigungsministeriums (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) hat es 2015 auf den Weg gebracht, nicht lange, nachdem ein russischer Nachrichtensender gefälschte Satellitenaufnahmen ausgestrahlt hatte, auf denen ein ukrainischer Kampfjet auf das – später abgestürzte – Verkehrsflugzeug der Malaysia Airlines (Flug MH 17) feuerte.

Eine Gruppe internationaler Ermittler hat inzwischen festgestellt, dass das Flugzeug von einer russischen Rakete abgeschossen wurde. Die falschen Satellitenbilder wurden nicht mit Hilfe von Deep Learning angefertigt, aber die DARPA sah die revolutionären Fortschritte kommen und wollte rechtzeitig dagegen gewappnet sein, sagt David Doermann, der frühere Chef von MediFor.

Das Programm arbeitet mit drei Verfahren, die sich mit Deep Learning automatisieren lassen. Das erste sucht auf der Ebene der einzelnen Bits nach Anomalien. Das zweite prüft nach, ob die gezeigte Szene den Gesetzen der Physik folgt, zum Beispiel ob die Gegenstände Schatten in die richtige Richtung werfen. Das dritte gleicht mit externen Daten ab: War das Wetter an dem Tag, an dem angeblich gefilmt wurde, wirklich so, wie es aussieht? Aus den Ergebnissen der drei Teilprüfungen soll eine Gesamtpunktzahl errechnet werden, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit das vorliegende Video eine Fälschung ist.

Ein weiteres interessantes Konzept stammt von der genannten Saarbrücker Arbeitsgruppe. Aus dem Paar gegnerischer generativer Netze ist der Diskriminator optimal darauf trainiert, das Werk des Generators als Fälschung zu erkennen. Also ist er auch zum Entlarven fremder Machwerke nutzbar.

Nur würde die andere Seite mit geeigneten Maßnahmen dagegenhalten. Die Fälscher würden sich bemühen, digitale Wasserzeichen nachzumachen und ihrerseits mit Hilfe von Deep Learning die Prüfalgorithmen hereinzulegen. Am Ende treiben sich spezielle gegnerische generative Netze, der Generator bei den Kriminellen und der Diskriminator bei den Aufpassern, jeweils zu Höchstleistungen. »Wir können dieses Spiel nicht gewinnen«, sagt Alexei Efros, Professor für Informatik und Elektrotechnik an der University of California in Berkeley und beteiligt an MediFor. »Wir können es den Bösen nur immer schwerer machen.«

Twitter und Facebook fördern durch ihre Konstruktion die Verbreitung von Fake News

Selbst wenn die automatische Entlarvung funktioniert, wird zwischen dem Auftauchen einer Lüge und ihrer Widerlegung immer eine gewisse Zeit vergehen. Deshalb kommt es entscheidend darauf an, dass die Social-Media-Branche der Verbreitung von überzeugenden gefälschten Videos Einhalt gebietet. »Man muss an der Verteilung ebenso ansetzen wie an der Erzeugung«, sagt Edelman. »Wenn ein Deepfake im Wald umfällt, hört das niemand, es sei denn, Twitter und Facebook verstärken es.«

Es ist derzeit weder klar, inwieweit die Social-Media-Unternehmen zu entsprechenden Schritten rechtlich verpflichtet sind, noch, wie eine solche Regulierung praktiziert werden könnte, ohne das verfassungsmäßige Recht auf Freiheit der Rede zu verletzen. Immerhin hat Facebook-Chef Mark Zuckerberg zugegeben, dass seine Plattform bei der Verbreitung von Fake News eine Rolle gespielt hat – wenn auch mit mehr als zehn Monaten Verzögerung nach den Wahlen von 2016. Facebook ist schließlich so konzipiert, dass Nutzer konsumieren und verbreiten, was sie interessiert, womit dem Populären systematisch der Vorrang vor der Wahrheit eingeräumt wird. Mit mehr als zwei Milliarden aktiven Benutzern ist die Plattform ein riesiges Pulverfass, an das jeder eine Lunte legen kann, der eine Wut erregende Lügengeschichte verbreiten will.

Seitdem hat Zuckerberg versprochen zu handeln. Als Erstes schiebt er Arbeit – und damit auch Verantwortung,

sagen einige – an die Nutzer ab, indem er sie bittet, die Vertrauenswürdigkeit von Nachrichtenquellen zu bewerten. Außerdem plane er, Desinformationen mit Hilfe von KI zu kennzeichnen. Über Einzelheiten gibt Facebook keine Auskunft. Einige Computerwissenschaftler sind skeptisch, was den Einsatz von KI betrifft, darunter Hany Farid, Professor für Computerwissenschaft am Dartmouth College, der die Versprechungen für »spektakulär naiv« hält. Bisher konnten nur wenige unabhängige Wissenschaftler untersuchen, wie sich gefälschte Nachrichten auf Facebook verbreiten, weil die Firma viele der relevanten Daten unter Verschluss hielt.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/kuenstliche-intelligenz](https://www.spektrum.de/t/kuenstliche-intelligenz)



ISTOCK / ADVENTR

Alle Entlarvungsalgorithmen der Welt werden jedoch nicht helfen, wenn die Entwickler der Technologie, die das Fälschen erst ermöglicht, sich nicht damit auseinandersetzen, wie ihre Produkte verwendet oder eben missbraucht werden. »Ich appelliere an die Vertreter der harten Wissenschaft«, sagt Persily, »sich mit den Psychologen, den Politikwissenschaftlern und den Kommunikationsspezialisten zusammenzutun, die seit einiger Zeit an diesen Fragen arbeiten«. Bisher geschah das eher selten.

Im März kündigte das Finnish Center for Artificial Intelligence eine entsprechende Initiative an. Psychologen, Philosophen, Ethiker und andere sollen KI-Forschern helfen, die weit reichenden sozialen Folgen ihrer Arbeit zu erfassen. Und im April hat Persily zusammen mit Gary King, einem Politikwissenschaftler an der Harvard University, die Social Data Initiative ins Leben gerufen. Erstmals sollen Sozialwissenschaftler auf Facebook-Daten zugreifen können, um detailliert zu untersuchen, wie Desinformation sich ausbreitet.

Da an der Spitze ein Verantwortungsvakuum herrscht, liegt es an Journalisten und engagierten Bürgern, die Fake-Videos bloßzustellen. Gegen Ende des Deepfake-Clips von Obama und Peele sagen beide Männer: »In Zukunft müssen wir wachsamer sein in Bezug auf das, was wir aus dem Internet glauben können. Wir leben in einer Zeit, in der wir vertrauenswürdige Nachrichtenquellen benötigen.« Vielleicht hat Obama diesen Satz in Wirklichkeit nie gesagt; wahr ist er trotzdem. ◀

QUELLEN

Lazar, D.M.J. et al.: The Science of Fake News. In: Science 359, S. 1094–1096, 9. März 2018

Marwick, A.E.: Why Do People Share Fake News? A Sociotechnical Model of Media Effects. In: Georgetown Law Technology Review 2, S. 474–512, 2018

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN FLÄCHEN- MAGISCHE QUADRATE

Die altherwürdigen magischen Quadrate haben neue, geometrische Geschwister bekommen.



Jean-Paul Delahaye ist emeritierter Professor der Universität Lille I und Forscher am Centre de recherche en informatique, signal et automatique in Lille (CRISTAL).

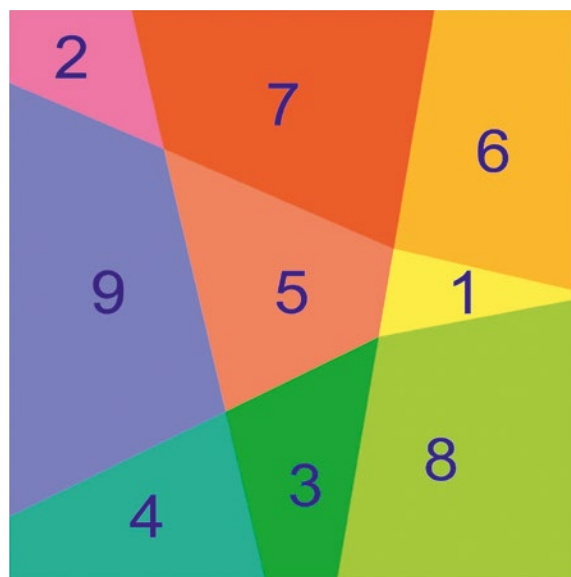
► spektrum.de/artikel/1603760

Die Geschichte beginnt ganz unspektakulär mit einer Neujahrsglückwunschkarte. Ende Dezember 2016 schickt der Brite William Walkington an seine Freunde, die sich wie er für Unterhaltungsmathematik begeistern können, zusammen mit den besten Wünschen ein magisches Quadrat neuer Art (Bild rechts oben). Es handelt sich um das klassische magische Quadrat der Ordnung 3 (»Lo Shu«), das bereits aus dem antiken China überliefert und im Wesentlichen – bis auf Drehungen und Spiegelungen – eindeutig bestimmt ist. Aber diesmal stehen in den 3 mal 3 Kästchen nicht nur die Zahlen von 1 bis 9 derart, dass alle Zeilen-, Spalten- und Diagonalsummen gleich 15 sind (»Magische Quadrate«, rechts); jedes Kästchen ist auch flächenmäßig so groß, wie die in ihm stehende Zahl angibt.

Damit ist die Idee der »area magic squares« (»flächenmagische Quadrate«) geboren – und findet alsbald begeisterte Anhänger. Binnen weniger Tage antworten die Freunde auf Walkingtons Karte und finden neue Verfahren, ein großes Quadrat so in Teilstücke zu zerlegen, dass ein flächenmagisches Quadrat dabei herauskommt.

Exakt formuliert lautet die Idee: Zerschneide eine geometrische Quadratfigur in n^2 Teilflächenstücke, die in n Zeilen und in n Spalten angeordnet zu denken sind. Schreibe

Der Neujahrsgruß von William Walkington enthält das erste flächenmagische Quadrat überhaupt.



WILLIAM WALKINGTON (CARTESMAGIQUES.BLOGSPOT.COM/2017/01/AREA-MAGIC-SQUARES-AND-TOP-OF-ORDER-3.HTML)

Best Wishes 2017

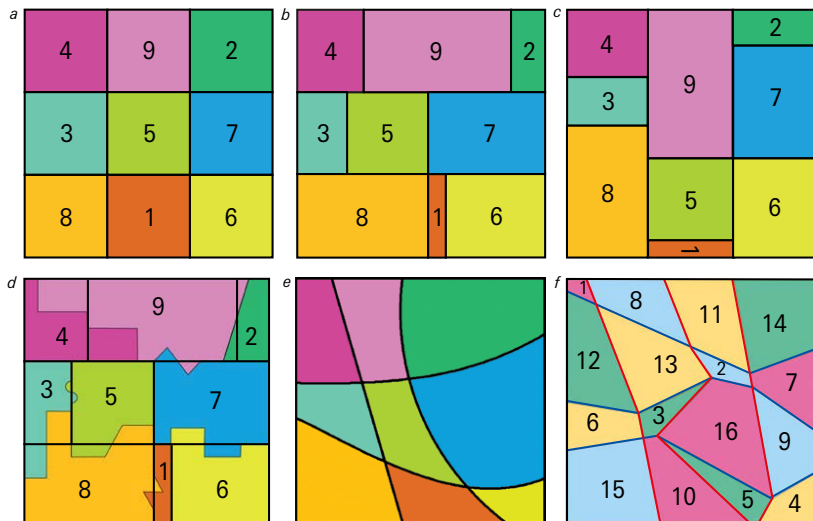
Magische Quadrate

Ein (allgemeines) magisches Quadrat der Ordnung n ist eine quadratische Tabelle mit n Zeilen und n Spalten, gefüllt mit verschiedenen ganzen Zahlen derart, dass die Summe der Einträge in jeder Zeile und in jeder Spalte stets den gleichen Wert S ergibt. Zusätzlich wird verlangt, dass die Zahlen in jeder der beiden Diagonalen des Gitters ebenfalls die Summe S ergeben. Für ein magisches Quadrat der Ordnung n ergeben sich somit $2n + 2$ verschiedene Zahlenreihen mit Summe S . Manchmal werden zusätzliche Anforderungen gestellt, zum Beispiel dass die Zahlen mit 1 beginnend aufeinanderfolgen (»klassisches magisches Quadrat«) oder sämtlich Primzahlen sind.

Magische Quadrate waren mehrfach Thema in den »Mathematischen Unterhaltungen«; eine Sammlung dieser Artikel findet sich im **Spektrum** Dossier 2/2008 »Lustvolle Geometrie«.

Flächen verformen

Man beginnt mit der Zerlegung des $3 \cdot 3$ -Quadrats in kleine Quadrate gleicher Fläche (a). Nun verschiebt man in jeder Zeile die vertikalen Trennwände zwischen den Teilfeldern, bis die Rechtecke den richtigen Flächeninhalt haben (b). Das gelingt, weil nach Voraussetzung alle Zeilensummen gleich sind. Statt mit vertikalen Trennwänden in jeder Zeile kann man auch mit horizontalen in jeder Spalte arbeiten (c). Zusätzlich hat man die Möglichkeit, die Teilflächen bei gleich bleibendem Flächeninhalt noch zu verformen, zum Beispiel indem man eine Fläche an einer Stelle ausbeult und zum Ausgleich an anderer Stelle eindehlt, während ihrer Nachbarfläche das Umgekehrte geschieht (d). Genauer: Man darf ein gerades Stück Grenze zwischen zwei Teilflächen durch eine Kurve ersetzen,



A - C: POUR LA SCIENCE. D - E: POUR LA SCIENCE. NACH: LEE SALONIS. F: WILLIAM WALKINGTON

die denselben Anfangs- und Endpunkt hat und punktsymmetrisch zum Mittelpunkt der ursprünglichen Strecke ist. Dabei bleiben die Flächeninhalte der beteiligten Teilflächen unverändert.

In diesen Zerlegungen ist allerdings die ursprüngliche Zeilen- und Spaltenstruktur nur mühsam bis gar nicht zu erkennen. Eigentlich wünscht man sich, dass die Trenn-

linien zwischen ehemaligen Zeilen und Spalten möglichst glatt von einer Seite des Gesamtquadrats zur gegenüberliegenden verlaufen, ohne mit ihresgleichen ein Stück gemeinsam zu haben (e). Das ist in dem flächenmagischen Quadrat der Ordnung 4 (f) erfüllt; aber die Spalten- (rot) und Zeilentrennlinien (blau) sind noch zu verknickt, um als schön gelten zu können.

in jedes Teilflächenstück dessen Flächeninhalt als Zahl hinein. Wenn diese n^2 Zahlen ein allgemeines magisches Quadrat bilden, spricht man von einem flächenmagischen Quadrat.

Bald stellt sich heraus, dass es mehr oder weniger schöne Zerlegungen gibt – und dass man über Schönheit auch hier verschiedener Meinung sein kann. Doch am Anfang steht die Frage nach der Existenz von Lösungen: Lässt sich aus jedem allgemeinen magischen Quadrat ein flächenmagisches machen?

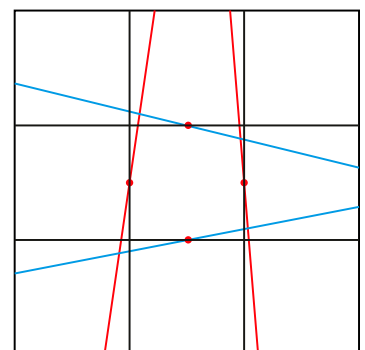
Die Antwort lautet zunächst: Ja! Man kann innerhalb einer Zeile oder Spalte kleine Quadrate so zu Rechtecken verformen, dass die Flächenbedingungen erfüllt sind, und noch ein bisschen mit den Trennlinien zwischen zwei Teilflächen spielen (»Flächen verformen«, oben). Dabei ergeben sich allerdings wenig schöne zickzackförmige Begrenzungslinien für die Zeilen und Spalten. Lassen sich diese uneleganten Schnittlinien vermeiden? Kann es vielleicht sogar ein lineares flächenmagisches Quadrat geben, das heißt eines, das nur durchgehende gerade Schnitte enthält?

Wenn man William Walkingtons Neujahrsgruß betrachtet, sieht es zunächst nicht so aus: Zwei der verwendeten Linien haben einen Knick, und wenn man deren größere Teile über den Knick hinaus verlängert, schneiden sie sich innerhalb des Quadrats. Die Frage blieb eine Weile ungeklärt, und der Freundeskreis machte sich auf eine intensive Suche.

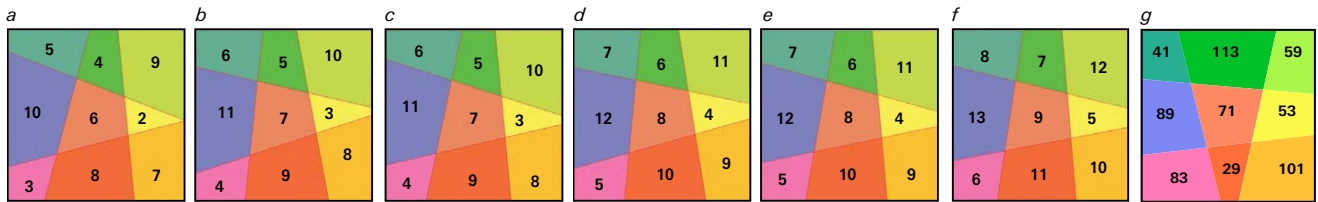
Für die Ordnung 3 fand Walter Trump, pensionierter Gymnasiallehrer aus Nürnberg (derselbe, der vor Jahren perfekte magische Würfel fand, *Spektrum* März 2004, S. 108), eine positive Antwort mit einem überraschend einfachen Verfahren. Man beginne wieder mit der Einteilung in $3 \cdot 3$ gleich große Quadrate und mache die Zeilen- und Spalten-trennlinien um ihre Mittelpunkte drehbar (Bild unten). Einerlei, wie man sie dreht, das entstehende Quadrat ist flächenmagisch, was die Zeilen- und die Spaltensummen angeht, denn was zum Beispiel der linken Spalte unten an Fläche weggenommen wird, bekommt sie oben wieder.

Nun sind nur noch die beiden verbleibenden Bedingungen an die Summen über die Diagonalen zu erfüllen. Dafür hat man die Drehwinkel der vier Zerschneidungsstrecken

Einerlei, wie man die roten Spalten- und die blauen Zeilentrennlinien um ihren jeweiligen Mittelpunkt dreht, die Flächen-summen über jede Zeile und jede Spalte bleiben unverändert; denn gegenüber dem Ausgangszustand wird jeder Zeile beziehungsweise Spalte ein Dreieck weggenommen und ein kongruentes Dreieck hinzugefügt.



POUR LA SCIENCE



Diese linearen flächenmagischen Quadrate der Ordnung 3 sind nach dem Verfahren von Walter Trump konstruiert. Wenn man die Konstante $x=1$ zu den Einträgen des klassischen Lo Shu addiert, existiert eine Lösung (a). Für $x=2$ gibt es zwei Lösungen (b und c), ebenso für $x=3$ (d und e). Von den beiden Lösungen für $x=4$ ist nur eine wiedergegeben (f). Das Verfahren funktioniert auch für ein magisches 3·3-Quadrat, das nur aus Primzahlen besteht (g).

als frei wählbare Parameter zur Verfügung. Das sind zwei Gleichungen mit vier Unbekannten; wenn diese überhaupt lösbar sind, bleiben im Allgemeinen zwei Parameter übrig, die man nach Belieben wählen kann – fast. Man darf die Winkel nicht so groß machen, dass zwei Linien sich im Inneren des Quadrats schneiden. Aber davon abgesehen kann man die verbleibende Freiheit so nutzen, dass die Inhalte der entstehenden Flächen – in einer geeigneten Maßeinheit – ganzzahlig werden oder sogar vorgeschriebene Werte annehmen.

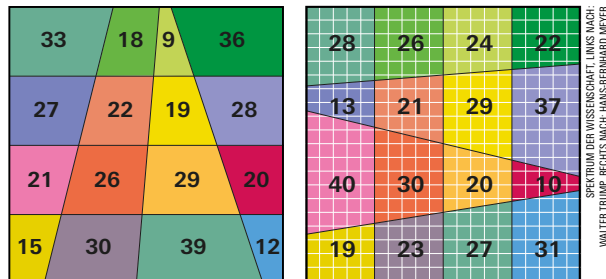
Das Lösen des Gleichungssystems überlässt man am besten dem Computer. Der berechnet der Reihe nach immer bessere Näherungen, bis die Abweichung von der exakten Lösung vernachlässigbar klein wird. Eine geschlossene, formelmäßige Darstellung der Lösung gibt es bislang nicht.

Wendet man dieses Verfahren auf das klassische Lo Shu an, so stellt sich heraus, dass sich die Trennlinien unweigerlich im Inneren des Quadrats schneiden. Wenn man allerdings zu jedem Eintrag des Lo Shu eine ganze Zahl x addiert, ergibt sich ein neues magisches Quadrat mit den Einträgen $1+x$ bis $9+x$. Die Überraschung war, dass ab $x=1$ das Verfahren ein zugehöriges lineares flächenmagisches Quadrat liefert, ab $x=2$ gibt es sogar jeweils 2 Lösungen. Jan van Delden, Fachhochschuldozent in Leeuwarden (Niederlande), hat das Verfahren auf ein magisches Quadrat aus lauter Primzahlen angewandt (Bild oben, g).

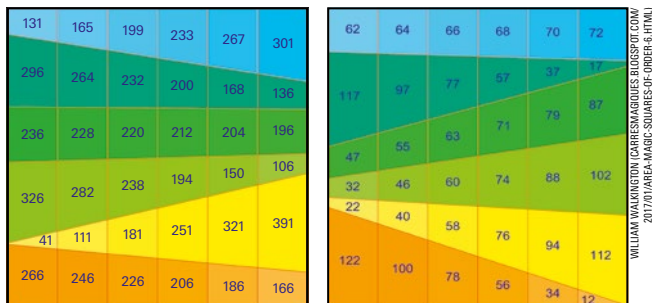
Es liegt nahe, die Suche nach magischen Flächenquadraten auf größere Exemplare auszudehnen. Je größer die Ordnung n des Quadrats ist, desto mehr Zahlen wollen an die richtige Stelle gesetzt werden. Allerdings wächst die Anzahl der zu erfüllenden Bedingungen weit langsamer als die Zahl der Möglichkeiten. Daher wird die Suche mit zunehmendem n zwar mühsamer, aber auch ergiebiger. Wenn man außerdem die Forderung aufgibt, dass die Einträge aufeinanderfolgende Zahlen sein sollen, wird die Menge der Lösungen nochmals reichhaltiger – so sehr, dass man selbst dann noch Lösungen findet, wenn man Zusatzbedingungen stellt.

Das erste flächenmagische 4·4-Quadrat fand ebenfalls Walter Trump wenige Wochen nach Walkingtons Glückwunschkarte, sogar ohne Computerhilfe. Wieder arbeitete er mit der Drehung von Trennlinien, diesmal jedoch mit der Zusatzbedingung, dass die horizontalen unter ihnen überhaupt nicht bewegt werden. Unter diesen Umständen fordert der Strahlensatz aus der elementaren Geometrie sein Recht: Die Zahlen in jeder Spalte müssen eine arithmetische Folge bilden, das heißt, die Differenz zwischen jeder Zahl und ihrer Vorgängerin ist konstant.

Ein weiteres 4·4-Quadrat fand Hans-Bernhard Meyer aus Au bei Freiburg (Bild links Mitte). William Walkington



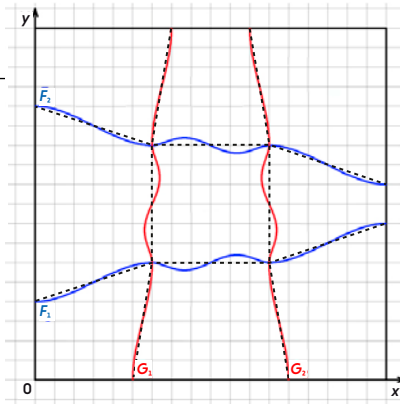
Die ersten flächenmagischen Quadrate der Ordnung 4 von Walter Trump (links) und Hans-Bernhard Meyer (rechts). Trump hat die horizontalen Trennlinien bestehen lassen, Meyer die vertikalen: ein unwesentlicher Unterschied, da man jedes flächenmagische Quadrat – ebenso wie jedes gewöhnliche magische Quadrat – um 90 Grad drehen kann, ohne dass sich an seinen definierenden Eigenschaften etwas ändert. Das weiße Linienraster im rechten Quadrat erlaubt es, die Flächen der Teilfelder durch Auszählen der Kästchen zu ermitteln.



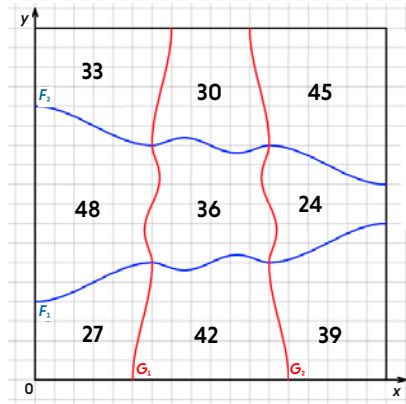
Lineare flächenmagische Quadrate der Ordnung 6 von William Walkington (links) und Hans-Bernhard Meyer (rechts). Letzteres hat die magische Summe 402, den kleinsten möglichen Wert dieser Klasse. In diesem Fall lassen sich die Schnittlinien exakt durch Wurzelausdrücke und rationale Zahlen beschreiben.

Geschwungene Linien

Zunächst konstruiert man ein nicht knickfreies flächenmagisches Quadrat der Ordnung 3, indem man in die Mitte des Quadrats ein Quadrat mit einem Neuntel der Gesamtfläche setzt und von dessen Ecken gerade Linien zu den Rändern des Quadrats zieht derart, dass die Bedingungen an die Teilflächen erfüllt sind (links). Von dieser Grundlage ausgehend ersetzt Walter Trump alle geraden Strecken durch gekrümmte, und zwar so, dass sich die Flächeninhalte nicht ändern; denn jede Kurve ist punktsymmetrisch zum



Mittelpunkt der Strecke, an deren Stelle sie tritt. Die Krümmung der Kurven stellt Trump nach dem Vorbild der Spline-Interpolation so ein, dass sie an den ehemaligen Knickpunkten glatt (mit gemeinsamer Tangente) ineinander übergehen (rechts).



$$F_1(x) = \begin{cases} H(54, 3, 5, x) & \text{für } 0 \leq x < 6 \\ J(x) & \text{für } 6 \leq x < 12 \\ H(54, 15, 7, x) & \text{für } 12 \leq x < 18 \end{cases}$$

$$G_1(y) = \begin{cases} H(108, 3, \frac{11}{2}, y) & \text{für } 0 \leq y < 6 \\ J(y) & \text{für } 6 \leq y < 12 \\ H(108, 15, \frac{13}{2}, y) & \text{für } 12 \leq y < 18 \end{cases}$$

$$F_2(x) = 9 - F_1(x) \quad G_2(y) = 9 - G_1(y)$$

$$H(a, x_0, y_0, x) = (x - x_0)(x - x_0 - 27)/a + y_0$$

$$J(x) = (9 - x)((9 - x)^2 - 9)^2 / 180 + 6$$

PROF. U. S. SCHLÖGE, MACHU, WALTER TRUMP
(WWW.TRUMP.DE/MAGIC-SQUARES/AREA-MAGIC/INDEX.HTML)

bestimmte noch im Januar 2017 das erste lineare magische 6·6-Flächenquadrat (mit 5 Vertikalen), Hans-Bernhard Meyer fand wenige Tage später das kleinste Exemplar dieser Klasse (Bild S. 80 unten, rechts).

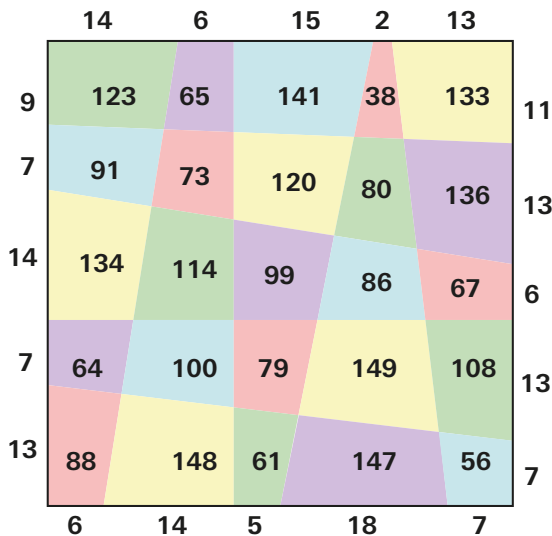
Die Suche nach flächenmagischen Quadraten der Ordnung 5 war unergiebig. Wenn es sie überhaupt gibt, dann sind die Einträge sehr groß. Daher hat Walter Trump die Forderung etwas abgemildert. Die Koordinaten der Punkte, in denen die Trennlinien den Rand des Quadrats treffen, sollen zwar ganzzahlig sein; aber es soll genügen, wenn die Inhalte der Teilflächen nur annähernd ganzzahlig sind und nach Rundung auf ganze Zahlen ein magisches

Quadrat ergeben. Unter dieser Voraussetzung fand Trump ein »gerundetes lineares magisches Flächenquadrat« (Bild unten).

Im Prinzip müssen die Trennlinien auch keine Geraden sein; nur knickfrei hätte man sie gern, damit es schöner aussieht. Das Problem hat Walter Trump ähnlich gelöst wie die Straßenbau-Ingenieure: An die Stelle einer alten Trasse mit scharfen Ecken setzen sie eine elegant gekrümmte, indem sie die Straße beiderseits der Ecke ein bisschen in die richtige Richtung ausbeulen. Eine geknickte Lösung des Problems ist zumindest für die Ordnung 3 nicht schwer zu finden. Wenn man die geraden Linien durch geschwungene ersetzt, muss man darauf achten, dass die Flächen erhalten bleiben (»Geschwungene Linien«, oben).

Ein neues Gebiet der Unterhaltungsmathematik hat sich aufgetan und bereits die ersten Früchte getragen. Aber hier gibt es sicherlich noch viel zu entdecken. ◀

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: WALTER TRUMP
(WWW.TRUMP.DE/MAGIC-SQUARES/AREA-MAGIC/INDEX.HTML)



Gerundetes lineares flächenmagisches Quadrat der Ordnung 5 von Walter Trump. Die Flächeninhalte der 25 Teilfelder weichen um höchstens 0,28 Prozent von den angegebenen gerundeten Werten ab.

QUELLEN

Meyer, H. B.: Beobachtungen über magische 4x4 Flächen-Quadrate mit vertikalen Linien. www.hbmeyer.de/backtrack/area/index1.htm

Trump, W.: Area Magic Squares. www.trump.de/magic-squares/area-magic/index.html

Van Delden, J.: Area magic squares of order 3. www.primepuzzles.net/puzzles/Pu865%20Area%20Magic%20Squares,%20JVD.pdf

Walkington, W.: Area Magic Squares and Tori of Order 3. <https://carresmagiques.blogspot.com/2017/01/area-magic-squares-and-tori-of-order-3.html>

Walkington, W.: Area Magic Squares of Order 4. <https://carresmagiques.blogspot.com/2017/02/area-magic-squares-of-order-4.html>

Walkington, W.: Area Magic Squares of Order 6. <https://carresmagiques.blogspot.com/2017/01/area-magic-squares-of-order-6.html>

WIKINGER PIONIERE IN EINER UNWIRTTLICHEN WELT

Jahrhundertlang trotzen Nordmänner auf Grönland den harschen Bedingungen der Arktis. Lockte sie das Elfenbein aus der Walrossjagd?



Zach Zorich (links) arbeitet als Journalist in Colorado, historische Themen bilden einen seiner Schwerpunkte. **Klaus-Dieter Linsmeier** ist Koordinator für Archäologie, Geschichte und Kultur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

» spektrum.de/artikel/1603762



SERIE

Historische Migrationen

Teil 1: Dezember 2018

Pioniere in einer unwirtlichen Welt

Zach Zorich und Klaus-Dieter Linsmeier

Teil 2: Januar 2019

Die vielen Wurzeln der Bayern

Michaela Harbeck, Brigitte Haas-Gebhard
und Joachim Burger

Teil 3: Februar 2019

Rekonstruktion einer Flucht

Andreas Reinecke

Insgesamt 78 elfenbeinerne Schachfiguren wurden 1831 auf der schottischen Insel Lewis entdeckt. Experten vermuten, dass sie im 12. Jahrhundert in Norwegen geschnitzt worden sind. Die Spielidee stammte aus arabischen Ländern und war wohl durch Handelskontakte nach Skandinavien gelangt.

Um das Jahr 985 waren die ersten Siedler von Island nach Grönland aufgebrochen, doch selbst zur Glanzzeit lebten auf der riesigen Insel nur etwa 3000 Menschen. Während die Isländer allen Herausforderungen bis in die heutige Zeit widerstanden, verfielen Grönlands Siedlungen im 15. Jahrhundert. Eine Übernutzung der beschränkten natürlichen Ressourcen sei der Grund gewesen, lautet eine gängige Theorie. Bedrängt von wachsenden Inlandgletschern und Meereis habe man in der Kleinen Eiszeit aufgeben müssen, ist eine zweite. In den letzten Jahren mehren sich aber die Indizien für eine weit komplexere Erklärung.

Am Anfang, so erzählen es isländische Sagas, standen Gewalt und Tod. Thorvald Asvaldsson, ein norwegischer Großbauer, und sein Sohn Erik wurden des Totschlags beschuldigt und nach Island verbannt. Doch Erik blieb jähzornig und gewaltbereit. Nicht allein seine Haarfarbe, sondern auch das Blut an seinen Händen soll ihm den Beinamen »der Rote« eingebracht haben. Im Streit tötete er erneut, und die Versammlung der freien Männer, das Thing, verurteilte ihn zu drei Jahren Verbannung. Da die Sippen seiner Opfer auf Blutrache sann, rüstete Erik ein Schiff aus und folgte früheren Berichten über eine unbekannte Insel, die abseits der üblichen Route nach Norwegen liegen sollte.

»Grünes Land« – ein Marketingtrick

Mit einer Hand voll Männer erreichte er das Ziel und ließ sich in einem geschützten Fjord nieder. Drei Jahre später kehrte er nach Island zurück und warb erfolgreich für das »grüne Land«: Mit einer Flotte von 25 Langschiffen brach er wieder auf, von denen allerdings nur 14 ankamen.

Als Motivation der Aussiedler vermuteten Historiker und Sozialwissenschaftler die Suche nach fruchtbarem Ackerboden und guten Weideflächen. Eine solche »Landnam« hatte Norweger zwischen 850 und 875 nach Island und auf die Färöer-Inseln geführt. Falls dies tatsächlich der Hauptgrund gewesen war, verdarb der Anblick der eisigen Felsküsten den Pionieren wohl erst einmal die Stimmung: Erik hatte sie mit einem Marketingtrick in eine Region gelockt, die noch stärker von arktischen Bedingungen geprägt war als Island.

Doch Anführer genossen in altskandinavischen Gemeinschaften eine besondere Machtfülle. Experten vermuten, dass ihre herausragende Stellung – neben Fortschritten in der Schiffstechnik und Seenavigation – die Expansion der Norweger im so genannten Wikingerzeitalter erst möglich gemacht hat. Diese Ära dauerte etwa von 800 bis 1066; die zeitlichen Grenzen variieren je nach Forschungsansatz. Manche Historiker beschränken den Begriff Wikinger zudem auf räuberische Gruppen, während sie von Kolonisten allgemeiner als Nordmännern sprechen.

Forscher verschiedener Fachrichtungen versuchen seit einigen Jahren, die Entwicklung beider Kolonien zu rekonstruieren, nicht zuletzt vor dem Hintergrund der drängenden Frage an unsere Zeit: Wie gelingt es Gemeinschaften, dramatische Veränderungen zu bewältigen?

Strontiumisotopen-Analysen bestätigen die Herkunft der Siedler: Die Isländer stammen aus Skandinavien und



von den nördlichen und westlichen Britischen Inseln, die ersten Grönländer wiederum von Island. Archäologen ermitteln Siedlungsmuster; Archäobotaniker zeichnen anhand von Pollenresten in Seesedimenten die Zusammensetzung der Vegetation in den verschiedenen Phasen der Kolonien nach; Archäozoologen untersuchen Tierknochen aus dem Abfall der Siedlungen; und Klimahistoriker durchforsten isländische Sagas und andere Überlieferungen nach Hinweisen auf eine Zunahme von Meereis.

Auf beiden Inseln zeigte sich anfangs das skandinavische Erbe: Die Bauern starteten die Viehzucht mit Rindern und Schafen sowie Schweinen und Ziegen. In vorchristlichen Gräbern Islands kamen auch Knochen von Pferden, Hunden und Katzen zu Tage. Vermutlich waren diese Tiere Teil heidnischer Rituale.

Von Beginn an ergänzte die Jagd, was auf den Tisch kam. Fische und Meeressäuger standen auf der Speisekarte, auf Island zudem Eier der an Inlandseen brütenden Wasservögel, auf Grönland Karibus. Die Skandinavier waren es aus ihrer Heimat gewohnt, die kargen Ressourcen flexibel zu nutzen. Dabei bewiesen die Isländer als Eiersammler Vorausschau: Bei Grabungen um den See Myvatn im Nordosten der Insel entdeckten die Archäozoologen zwar Schalen, jedoch kaum Vogelknochen. Offenbar hatten die Siedler gelernt, diese Nahrungsquelle nachhaltig zu nutzen. Hingegen dezimierten sie mit der Zeit die Bestände an standorttreuen Robbenarten. Hier waren die Grönländer im Vorteil: Manche Fjorde wurden saisonal von so vielen Exemplaren anderer Robbenarten aufgesucht, dass diese Ressource kaum auszuschöpfen war.

Auch die Siedlungsmuster spiegelten die Verhältnisse in der Heimat wider. Wer etwas zu sagen hatte, sicherte sich den größten Grundbesitz; kleinere Gehöfte verteilten sich im Umfeld. Es gab zudem eine zeitliche Strukturierung. Wer zuerst kam, baute küstennah und auf fruchtbarem Boden. Späteren Migranten blieben die kargeren Randgebiete. Wie auch immer sich die Gesellschaft im Detail formte, es gab Groß- und Kleinbauern wie in Skandinavien.

Gleichwohl zeigen sich große Unterschiede zur Heimat. Auf Grund des polaren Klimas lag ein Großteil Grönlands

unter Gletschern verborgen, und auch vom Meer drohte Eis. Der Vegetation standen bloß wenige Monate im Jahr zur Verfügung, um sich zu entfalten, weshalb nur in wenigen geschützten Tälern im Landesinnern Bäume wuchsen. Anders in Island, wo die Ankömmlinge Birkenwälder vorfanden, ein Ergebnis des warmen Irmingerstroms, eines Zweigs des Golfstroms. Wann immer aber Meereis in großem Umfang bis in Küstennähe kam, folgten ein Temperaturrückgang und Einbrüche der landwirtschaftlichen Produktivität.

Dementsprechend lebten Anfang des 12. Jahrhunderts 50 000 bis 60 000 Menschen auf Island, die sich über die ganze Insel verteilten. Auf Grönland hingegen waren es nie mehr als die genannten 3000, die vor allem an der Westküste in den von Forschern als West- und Ostsiedlung bezeichneten Gebieten und der näheren Umgebung wohnten (siehe Karte rechts).

Steine, Gras und Sträucher

Siedlungsruinen, die Archäologen in Vatnahverfi an Grönlands Südspitze entdeckten, vermitteln ein Bild vom Leben in diesen Kolonien. Vatnahverfi war wohl eines der reicheren Gebiete der Ostsiedlung. Wie Finger ragen die Halbinseln dieser Gegend in die See hinein. Hinter schmalen, steinigen Stränden bedeckt Gras den Boden, auf dem heute noch Schafe weiden. Vor allem aber prägen Sträucher die Landschaft, die sich daher vor allem zur Haltung der anspruchsloseren Ziegen eignete. Seit der Wikingerzeit hat sich das kaum geändert.

Von den alten Gebäuden sind lediglich die moosbewachsenen Grundmauern erhalten. Die Anordnung der Häuser und Wirtschaftsgebäude gleicht jener in Skandinavien und Island zu dieser Zeit: ein Hauptgebäude mitten im besten Weideland, auf den Wiesen darum herum kleinere Gebäude, in denen man ebenfalls wohnte und arbeitete. Bei ihren Ausgrabungen in Vatnahverfi stießen Konrad Smiarowski vom New Yorker Hunter College und Christian Koch Madsen vom Greenland National Museum & Archives auf 8 Haupt- und 47 kleinere Gehöfte. Dazu kamen 86 Hütten, die als Unterstände für Tiere und als einfache Wirtschaftsgebäude dienten, also um Schafe zu scheren und Kühe sowie Ziegen zu melken. Insgesamt lebten in Vatnahverfi wohl zwischen 250 und 530 Menschen.

In den letzten fünf Jahren erforschten Koch Madsen und andere Archäologen Fjorde südlich davon. Bislang galten von den Konzentrationsgebieten entfernte Siedlungen als klein und unbedeutend, doch hier stießen die Forscher auf Belege großer landwirtschaftlicher Betriebe. Vermutlich hielt man dort Schafe und Ziegen, zudem wohl einige Kühe, jagte aber auch Meeressäuger. Möglicherweise waren diese Siedlungen sogar darauf spezialisiert, deren Fleisch sowie Treibholz an die Hauptsiedlungen zu liefern.

Die Organisation der Höfe spiegelt die genannte Hierarchie wider, meint Thomas McGovern, ebenfalls vom Hunter College. Der Archäologe erforscht seit den 1970er Jahren Fundplätze auf Grönland und in anderen nordatlantischen Gegenden. Eine nach Rang gegliederte Elite von Landbesitzern ließ Neuankömmliche auf ihren Gütern leben und gewährte ihren Herden Zugang zu den Weide-

AUF EINEN BLICK WIKINGER AUF WALROSSJAGD

- 1 Seit Ende des 1. Jahrtausends unterhielten Nordmänner eine Handelskolonie auf Grönland, doch um 1450 verließen sie die Insel innerhalb kurzer Zeit.
- 2 Lange Zeit galt dies als Ausdruck einer mangelnden Anpassung an die arktischen Verhältnisse. Tatsächlich aber nutzten die Nordmänner alle Ressourcen Grönlands wie die Robben- und Walrossjagd.
- 3 Eine dramatische Klimaabkühlung sowie ein Einbruch des europäischen Markts für Walrosselfenbein überforderten schließlich ihre Möglichkeiten, zu überleben.

Eisige Kolonien

Um 1000 n. Chr. fuhren Nordmänner vor allem von der Wikingerkolonie auf Island aus nach Grönland, wo sie sich in einer östlichen und in einer westlichen Siedlung niederließen. Sie unterhielten weiterhin enge kulturelle und politische Verbindungen zu ihren Heimatländern. An Orten wie Vatnahverfi bauten sie Bauernhöfe im selben Stil, wie sie in ganz Skandinavien und Island üblich waren, und hielten Schafe sowie Rinder. Sie mussten aber auch andere Nahrungs- und Einkommensquellen finden, weshalb sie Fischer, Karibu- und Seehundjäger wurden. Zudem fuhren sie in kleinen Booten entlang der Westküste Grönlands nach Norden bis zur Diskobucht, um Walrosse zu jagen. Die Nordmänner exportierten deren Elfenbein und Fell nach Europa, bis die Nachfrage danach einbrach.



erlegen. Das war eine Gemeinschaftsaufgabe und erforderte eine gute Koordination durch einen Anführer – entsprechend der skandinavischen Gesellschaftsordnung.

Ebenfalls noch auf Island hatten die Auswanderer das Jagen von Walrossen erlernt. Und diesem Beutetier messen Forscher heutzutage einen immer größeren Stellenwert zu, wenn sie nach Antworten auf die Frage suchen: warum ausgerechnet Grönland?

Möglicherweise motivierte nicht die Suche nach Weide- und Ackerland, Erik dem Roten in die Arktis zu folgen, sondern die Aussicht auf eine lukrative Jagdbeute. Denn jedes erwachsene Walross, auch ein Weibchen, trägt zu Hauern verlängerte Eckzähne. Diese zeigen den Rang eines Tiers an, dienen der Verteidigung, brechen Atemlöcher ins Eis – und bestehen aus Elfenbein.

Das weiße Gold der Arktis

Das Material wurde in ganz Nordeuropa und auf den Britischen Inseln zu kunstvollen Schnitzereien verarbeitet. Etwa zu dem auf der Hebrideninsel Isle of Lewis entdeckten Schachspiel aus 78 Figuren (siehe Bild S. 82/83), das vermutlich norwegische Handwerker im 12. Jahrhundert schufen. Inzwischen sehen viele Forscher im Elfenbein den Hauptgrund für die Kolonisierung Grönlands und auch Islands. Denn dort stießen Archäologen schon in den ältesten Siedlungsschichten auf Überreste von Walrossunterkiefern, was bereits für eine ausgereifte Technik der Gewinnung spricht: Statt die Hauer eines getöteten Tiers abzusägen, wartete man einige Wochen, bis sich das Weichteilgewebe zersetzt hatte, und legte dann die Wurzel des Stoßzahns im Kiefer frei.

Vermutlich etliche tausend Tiere lebten in der Diskobucht an Grönlands Westküste, die von den Wikingern wohl »Nordursetur« genannt wurde, nördliches Jagdgebiet. Doch diese Region lag bis zu 800 Kilometer von den beiden Hauptsiedlungen entfernt. War die Robbenjagd bereits ein gemeinschaftliches Unternehmen, für das die Großbauern Boote stellten, galt das für das Erbeuten von Elfenbein umso mehr. Schließlich waren die Jäger einige Tage zu jener Bucht unterwegs, und danach mussten die abgetrennten Köpfe der erlegten Tiere zu den Siedlungen befördert werden. Auch die Felle der Tiere waren begehrt, weil sich daraus sehr belastbare Seile für die Seefahrt

gründen, erklärt Jette Arneborg vom Dänischen Nationalmuseum in Kopenhagen. Im Gegenzug erhielten sie einen Anteil an den Erträgen. Diese Struktur galt auch für die Jagd: Wer Robben erbeuten wollte, musste sich mit den Eigentümern der Küstenstriche arrangieren.

Schon in den ersten Jahren nach ihrer Ankunft passten die Grönländer ihre Wirtschaftsweise an die neue Umgebung an. Die kurze Vegetationszeit beschränkte die Menge an Heu und anderem Viehfutter. Je nach Winter mussten Rinder aber neun Monate im Stall versorgt werden. Daher gaben vor allem die Besitzer kleinerer Gehöfte deren Zucht zu Gunsten der Haltung von Schafen und gelegentlich Ziegen auf, die länger auf den Weiden bleiben konnten. Milch und Rindfleisch wurden Luxusgüter der Oberschicht.

Außerdem verlor Meeresfisch an Bedeutung, wie archäologische Grabungen verraten. Diesen überraschenden Befund erklärten die Archäozoologin Ramona Harrison vom Hunter College und ihre Kollegen 2014 in einer Publikation unter anderem durch die polaren Bedingungen: In Norwegen und auf Island fuhr man im Winter zum Fischen aus, wenn die Landwirtschaft dafür mehr Zeit ließ. Bei Temperaturen um den Gefrierpunkt trocknete der Fang an der Luft zu Stockfisch, einer lange haltbaren Eiweißquelle. Auf Grönland aber war es im Winter schlicht zu kalt für diesen Prozess, während die Robbenjagd gerade jetzt reiche Beute versprach.

Die Grönländer kannten sie bereits aus dem Baltikum und aus Island. Es gelang ihnen, ihre Techniken an die Bedingungen Grönlands anzupassen. Wahrscheinlich trieb man die Tiere im offenen Gewässer der Fjorde mit Booten und Netzen zusammen, um sie dann mit Speeren zu



MIT FREI. GEB. VON CHRISTIAN HOCH MADSEN

Die Ruine der Kirche von Hvalsey steht auf den Resten eines Gutshofs in der östlichen Siedlung Grönlands. Vermutlich wurde die Kirche im 13. Jahrhundert erbaut.

herstellen ließen. Weil die Grönländer laut Jette Arneborg unbedingt ein Handelsprodukt benötigten, um überlebenswichtige Güter zu importieren, war die Walrossjagd vielleicht neben den polaren Bedingungen ein weiterer Grund, die Stockfischproduktion im Winter weitgehend aufzugeben: Im Sommer wurden alle verfügbaren Boote und Männer für die Walrossjagd in der Diskobucht benötigt.

Dass sie auch der Grund für die Kolonisierung war, ist plausibel, doch nicht unumstritten. Forschern des Osloer Centre for Ecological and Evolutionary Synthesis und des McDonald Institute for Archaeological Research in Cambridge (England) gelang es 2018, Walrosspopulationen der Westküste Grönlands von solchen der Barentssee genetisch zu unterscheiden (auch Russland war eine Quelle für dieses Elfenbein). Ein Vergleich mit sieben in Europa gefundenen Elfenbeinobjekten aus der Zeit vor 1120 bestätigte nur in einem Fall die Herkunft von den nordatlantischen Jagdgebieten. Das macht eine besondere Bedeutung Grönlands während seiner frühen Kolonisierungsphase nach Ansicht der Osloer Forscher zumindest diskussionswürdig.

Für die spätere Zeit bis 1400 hingegen sieht es anders aus: Zehn von zwölf Artefakten aus Walrosszahn stammen von Grönland – der Handel mit Europa wurde intensiver. Das spiegeln auch die Überlieferungen. Diesen zufolge versprachen die Siedler dem norwegischen König Haakon IV. (1204–1263) die Kontrolle über den Elfenbeinhandel und Steuern, sofern er sicherstellte, dass ein Frachter sie alljährlich mit allem Notwendigen versorgte. Ein Jahr später folgte Island dem Vorbild. Durch diese regelmäßigen Handelskontakte waren beide Kolonien in den europäischen Wirtschafts- und Kulturraum eingebunden.

Während einfache Jäger und Feldarbeiter sicherlich Not hatten, satt zu werden, profitierten wohlhabende Landbesitzer von der Entwicklung. Schon im vorchristlichen Norwegen war es Aufgabe und Privileg der Eliten gewesen, Kultstätten zu errichten. Im vermutlich von Anfang an christlichen Grönland waren das Kirchen (siehe Bild links), deren Bau die gesellschaftliche Stellung der Anführer untermauerte. Denn die Bauernhöfe lagen weit verstreut, was den gesellschaftlichen Zusammenhalt beeinträchtigte. Man traf sich aber zur Messe in den Gotteshäusern, vermählte dort junge Paare und übergab die Verstorbenen der Fürsorge Gottes. Kurz: Kirchen waren Kristallisationspunkte für das Miteinander. Dementsprechend kennzeichnen die Ruinen von Gotteshäusern vermutlich die Landgüter der bedeutendsten Grönländer. Weitläufige Güter ohne Kirchen gehörten untergeordneten Großbauern, dazu kam eine Vielzahl mittlerer und kleinerer Gehöfte der abhängigen Landwirte.

1123 schickte der norwegische König den Priester Arnald als ersten Bischof nach Grönland. Das hatte möglicherweise auch wirtschaftliche Gründe: Der Papst liebte Verzierungen aus Elfenbein. Mikkel Sørensen, Experte für Geschichte und Archäologie der Grönland-Inuit an der Universität Kopenhagen, vermutet, dass es dem jeweiligen Amtsinhaber oblag, die Versorgung damit zu gewährleisten. Arneborg hingegen nimmt an, dass die Kirche mehr an den Handelserlösen interessiert war als an der Ware selbst. Letztlich aber kontrollierten Norwegens Herrscher die wichtige Elfenbeinquelle. Die Nachfrage stieg, wie Werkstattabfälle von Walrosszähnen aus mittelalterlichen Fundstellen in Skandinavien, Irland und Deutschland belegen.

Der Anfang vom Ende

Doch das Wirtschaftswachstum hielt nicht lange an. Als der indonesische Vulkan Samalas 1257 ausbrach, schleuderte er so große Mengen an Partikeln in die Atmosphäre, dass sich die Sonneneinstrahlung deutlich verringerte. In arktischen Regionen sank die Temperatur weiter. Gut ein Jahrzehnt lang machten wohl heftige Unwetter und Meer-eis die Schiffspassage zwischen Island und Grönland riskanter.

Obwohl die Wikingersiedlungen auf Grönland noch rund 200 Jahre weiterbestanden, galt die Klimaverschlechterung vielen Wissenschaftlern als Anfang vom Ende. Nicht willens oder nicht fähig, sich den neuen Bedingungen anzupassen, hätten die Siedler schließlich aufgegeben. Thomas McGovern wendet dagegen ein: »Bis 1250 sind die Grönländer immer wieder erfolgreich durch schlechte Zeiten gegangen.« Die bis dahin zielführenden Strategien der Anpassung wurden intensiviert: Knochen aus Abfallgruben des Hochmittelalters zufolge leisteten sich nur noch die Wohlhabendsten Milchkuhe, alle anderen Viehzüchter verlegten sich auf Schafe und Ziegen. Offenbar wurden entlegene und kleine Gehöfte aufgegeben, denn Ställe und Weidemauern verfielen. Die Weiden selbst blieben ungenutzt, wie Pollen von Wiesenpflanzen in den Sedimenten naher Seen vermuten lassen. Manch ein kleinerer Bauer mag noch als Pächter bei einem große-

ren oder gar als Knecht oder Sklave sein Auskommen gefunden haben. Vor allem aber intensivierten Isländer und Grönländer die Robbenjagd als Proteinlieferant.

Der Blick nach Island zeigt, dass man dort weit weniger unter der Klimaverschlechterung zu leiden hatte. Eine Gegenmaßnahme war die Ausweitung des Außenhandels. Dazu gehörte die Stockfischproduktion: Die Menge von Fischköpfen in den Müllhalden ließ sich durch die Nahrungsversorgung allein nicht erklären. Zudem verlegten einige größere Landbesitzer ihre Wohnsitze in Fischereigebiete, vermutlich um dieses Geschäft besser kontrollieren zu können. Eine zweite auf den Export ausgerichtete Maßnahme war zunehmende Schafhaltung. Weil vor allem Knochen älterer Tiere zu Tage kommen, gehen Experten von einer intensivierten Wollproduktion aus – was hätte den Bedarf Nordeuropas in dieser Zeit besser getroffen?

Die Grönländer aber handelten weiterhin mit Walrosselfenbein, wie die konstant hohe Zahl von Unterkiefern belegt. Mochte die Kaltzeit den Warentransport auch erschweren, half dieser Exportschlager zumindest noch durch die harten Jahre bis 1300. Der Ausbruch der Pest auf dem Kontinent brachte das Wirtschaftsmodell jedoch in Schieflage. Zwischen 1346 und 1353 fiel fast ein Drittel der Europäer dem Schwarzen Tod zum Opfer. Norwegen war besonders schwer betroffen, dort starben fast 60 Prozent der Bevölkerung. Deshalb stachen nach 1369 keine Schiffe mehr von dort in Richtung Arktis in See.

Zu allem Unglück sollte sich die Einbindung in einen europaweiten Handel mit Luxusgütern nun auch als Nachteil erweisen. Tatsächlich waren Walrosszähne nur deshalb so gefragt gewesen, weil Elefanteneifenbein aus Afrika oder Asien die Großhändler weit teurer kam. Denn als eine Begleiterscheinung der Kreuzzüge hatte die Piraterie im östlichen Mittelmeer überhandgenommen. Doch Ende des

14. Jahrhunderts flauten die Konflikte zwischen Christen und Muslimen ab, zwei Kreuzzüge richteten sich sogar explizit gegen Piraten. Als die alten Handelsrouten wieder offen waren, schwand das Interesse an grönländischem Elfenbein, erklärt der dänische Mittelalterarchäologe Sören Sindbaek von der Universität Aarhus.

Fisch und Wolle für den Krieg

Zudem veränderten sich die Märkte. Während Großkaufleute früher mit wertvollen Gütern wie Gold, Pelzen und Elfenbein ihr Geld machten, vertrieben sie nun vorwiegend Massenprodukte und geringwertige Waren wie Stockfisch und Wolle aus Island. »Walrosselfenbein ist nur dann wertvoll, wenn die Leute sagen, dass es das ist«, erklärt McGovern. »Mit Fisch und Wolle hingegen kann man Armeen ernähren und kleiden.« Und in einem von Machtkämpfen und Kriegen zwischen sich herausbildenden Staaten zerrissenen Europa kam dem Unterhalt von Söldnern immer größeres Gewicht zu (siehe »Ein adeliger Söldnergeneral«, **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 1/2018, S. 28). Diesen grundlegenden Wandel vermochten die Grönländer nicht mitzugehen, konstatiert McGovern. »Sie steckten in den alten Wirtschaftsstrukturen fest, produzierten qualitativ Hochwertiges in kleiner Stückzahl, während es die Isländer verstanden, eine steigende Nachfrage nach Massengütern zu befriedigen.«

Als genüge das noch nicht, sahen sich die Nordmänner Grönlands seit dem 13. Jahrhundert von Eindringlingen aus dem Norden bedroht. Zu jener Zeit, als Erik der Rote auf Grönland seine Siedlung errichtete, schien das Land gänzlich unbewohnt. Es mag zwar sein, dass eine Volksgruppe, die man Paläoeskimos oder Late-Dorset-Leute nennt, schon auf der Insel lebte, dann aber weit im Norden. Später jedoch fuhren Inuit der so genannten Thule-Kultur in ihren »umiak« – Booten aus Tierhäuten – die Küste entlang, um Wale zu jagen, und gelangten schließlich zur Diskobucht. Ein Text aus dem 14. Jahrhundert legt nahe, dass die Nordmänner ihnen nicht friedlich begegneten. Offenbar zogen sie dabei aber den Kürzeren: Gegen Ende des 14. Jahrhunderts gaben sie die westliche Kolonie auf.

Klimatische, politische und wirtschaftliche Veränderungen, Pest und Invasoren bildeten einen ganzen Komplex von Problemen, der die Nordmänner schließlich überforderte. Reiche Landbesitzer versuchten es mit dem »Weiter wie bisher« und bauten ihre Kirchen aus. Doch als ein weiterer Klimaschock die Region 1425 heimsuchte, bedeutete er tatsächlich das Ende: Um 1450 wurde die Kolonie aufgegeben. ◀

QUELLEN

Frei, K. M. et al.: Was it for Walrus? Viking Age Settlement and Medieval Walrus Ivory Trade in Iceland and Greenland. In: *World Archaeology* 3, S. 439–466, 2015

Hartman, S. et al.: Medieval Iceland, Greenland, and the New Human Condition: A Case Study in Integrated Environmental Humanities. In: *Global and Planetary Change* 9, S. 123–139, 2017

Star, B. et al.: Ancient DNA Reveals the Chronology of Walrus Ivory Trade from Norse Greenland. In: *Proceedings of the Royal Society B* 10.1098/rspb.2018.0978, 2018

LENNART LARSEN / NATIONALMUSEET, DANMARK (SAMLINGER MATIUS.DK/DNR/ASSET/167851) / CC-BY-SA 2.0 CREATIVE COMMONS ORGANISATION/LEGAL/DOE/ BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Ein elfenbeinerer Aufsatz eines Bischofsstabs zeugt vom Einfluss der katholischen Kirche in der Arktiskolonie.

REZENSIONEN



BBC
DIE WELT DER RAUBKATZEN
Dokumentation
Laufzeit ca. 150 Minuten
polyband, München 2018
€ 14,99 (DVD), € 16,99 (Blu-ray)

BIOLOGIE RAUBKATZEN AUF DER SPUR

Von Löwe bis Fischkatze stellt diese BBC-Produktion eine Vielzahl von Arten vor.

Die dreiteilige Dokumentation (auf DVD oder Blu-ray) widmet sich einer überaus vielfältigen und spannenden Tiergruppe: der Familie der Katzen (Felidae), genauer den Raubkatzen, zu denen die Großkatzen, die Geparden und die Pumas gehören. Dabei bekommen die Zuschauer Einblicke in bisher undokumentierte

Verhaltensweisen, von der Jagd über die Paarung bis hin zu kognitiven Leistungen. Natürlich sind klassische Großkatzen wie Tiger und Löwen zu sehen, doch der Fokus liegt auf kleineren, wenig bekannten Katzenarten. Dabei zeigt sich, dass diese nicht weniger spannend sind als ihre größeren Verwandten.

In der ersten Episode geht es um Luchse (*Lynx*) und Leoparden (*Panthera pardus*), vor allem aber um Schneeleoparden (*Panthera uncia*), deren systematische Stellung noch nicht völlig geklärt ist. Die Tiere sind wegen ihrer Seltenheit, ihres unzugänglichen Lebensraums in hohen Gebirgslagen und wegen der beeindruckenden Größe ihrer Reviere nur schwer mit der Kamera einzufangen. Szenisch aufbereitet zeigt die Dokumentation, wie es trotzdem gelingen

kann, Aufnahmen von ihnen zu machen – eine ungewohnte Perspektive. Die Vor- und Nachteile entsprechender Expeditionen, die durchaus auch einmal erfolglos enden können, treten klar hervor.

Die zweite Episode stellt den Zuschauern verschiedene Vertreter der Katzen vor, darunter einen recht außergewöhnlichen: Die Fischkatze (*Prionailurus viverrinus*) ist perfekt für die Jagd im Wasser geeignet – eine eher unerwartete Eigenschaft bei den sonst so wasserscheuen Tieren. Das Fell erfüllt dabei die Funktion eines Neoprenanzugs, und an den Pfoten haben die Raubtiere sogar Ansätze von Schwimmhäuten. Der dritte Teil begleitet verschiedene Wissenschaftler auf ihre Expeditionen. Dabei lernt man unter anderem eine Forscherin kennen, die beweisen

möchte, dass Löwen die intelligentesten Katzen sind, weil sie als einzige Vertreter ihrer Familie in Rudeln leben. Tests haben tatsächlich ergeben, dass Löwen allein durch Beobachtung voneinander lernen können.

Grandiose Filmmusik untermalt die atemberaubenden Aufnahmen, die mit gestochen scharfer Bildqualität überzeugen. Der Soundtrack deckt das Spektrum von Klassik bis Rockmusik ab und verstärkt die von den Bildern transportierten Stimmungen genau im richtigen Maß.

Leider ist nicht klar erkennbar, welchem Prinzip die Einteilung in drei Episoden folgt, denn diese bauen nicht aufeinander auf. Manches wird in den verschiedenen Teilen mehrfach behandelt – etwa der Umstand, dass Geparden nicht nur wegen ihrer Schnelligkeit, sondern vor allem



Jaguare (*Panthera onca*) sind die größten Katzen in Amerika. Sie haben einen extrem starken Biss, mit dem sie mühelos Schildkrötenpanzer knacken.

BBC NEWS/PATRICK WILLIAMS 2017, AUS BBC-BIG CATS MIT FOTOL. GERH. VON POLYBAND, MÜNCHEN

wegen ihrer Wendigkeit so erfolgreich jagen. Sicher trägt eine solche Redundanz dazu bei, sich das Gesehene besser einzuprägen. Dennoch könnte eine deutlichere Abgrenzung zwischen den Episoden von Vorteil sein, etwa wenn man bestimmte Szenen später noch einmal anschauen möchte und sie sucht.

Am Ende schafft es der Film, nicht nur auf seltene Katzenarten aufmerksam zu machen, sondern auch häufige in neuem Licht erscheinen zu lassen und sie einem breiten Publikum näherzubringen. Die Dokumentation eignet sich sowohl für interessierte Fachleute als auch für Familien mit Kindern.

Die Rezensentin Donata von Bistram studiert Biologie und hat ein redaktionelles Praktikum bei »Spektrum der Wissenschaft« absolviert.

DIGITALISIERUNG DER MENSCH IN DER AUTOMATENWELT

Roboter, maschinelles Lernen und Industrie 4.0: Unsere Kultur beginnt sich radikal zu wandeln. Wo führt das hin?

► In die lebhafte Debatte über Wohl und Wehe der Digitalisierung schaltet sich nun auch Julian Nida-Rümelin ein. Er ist nicht nur Philosophieprofessor mit Schwerpunkt Ethik an der Münchener Universität, sondern hat sich auch politisch engagiert, unter anderem 2001/2002 als Kulturstatsminister unter Kanzler Gerhard Schröder sowie 2009 bis 2013 als Vorsitzender der SPD-Grundwertekommission. Es verspricht

interessant zu werden, was der weltgewandte Denker, gewiss kein Stubengelehrter, über »eine Ethik für das Zeitalter der künstlichen Intelligenz« zu sagen hat.

Trockene Lektüre ist nicht zu befürchten, denn Koautorin Nathalie Weidenfeld steuert zu Beginn jedes Kapitels die kurze Nacherzählung eines bekannten Sciencefiction-Films bei. Da es dabei um autonome Roboter, virtuelle Realität und den Menschen gefährdende Hypertechnik geht, ist man gleich beim Thema.

Nida-Rümelin bezieht eindeutig Position. Nach seiner Überzeugung kann es so etwas wie künstliche Intelligenz im Wortsinn gar nicht geben, denn echtes Denken sei ausschließlich uns Menschen vorbehalten. Nur unsereins vermöge ethische Entscheidungen zu treffen, nur wir könnten Gründe für dieses oder

jenes Handeln abwägen. Maschinen, so der Autor, simulierten intelligentes oder moralisches Verhalten bloß – je nach ihrer Programmierung mehr oder weniger gut.

Der Autor verteidigt diesen Standpunkt, indem er scharf gegen »eine antihumanistische mechanistische Weltsicht« polemisiert, die durch die moderne Hirnforschung Auftrieb bekommen habe. Wörtlich: »Die Beobachtung einer neuronalen Korrelation darf uns nicht zu der (mechanistischen) Ideologie verführen, wonach alle menschlichen Entscheidungen mit Hirnaktivitäten zu identifizieren sind.«

Und womit sonst? Mit spontanen Wundertaten? Tatsächlich versteigt sich Nida-Rümelin kurz darauf zu dem Satz: »In Analogie zu einer mittelalterlichen

Konzeption Gottes als unbewegtem Beweger ist der Mensch Akteur.«

Das kommt davon, wenn man wie Nida-Rümelin den Naturalismus, dem zufolge in der Natur alles mit rechten Dingen zugeht und sich naturwissenschaftlich erklären lässt, explizit als »offensichtlich falsch« verdammt. Mit welcher Begründung? Weil, so der Autor, nur wir Menschen die Qualität einer Farbe erleben und Schmerzen empfinden, während Maschinen bestenfalls so tun können, als ob. Das ist das berühmte Qualia-Argument der Bewusstseinsphilosophen David Chalmers und Frank Jackson, dessen Diskussion dicke Bücher füllt. Demnach ist ein privates Farberlebnis etwas unaussprechlich Einmaliges und Eigenes, das niemals mit dem Lehrbuchwissen über Hirnvorgänge bei der Farbwahrnehmung erfasst werden kann.

Nur: Wie spricht man über Unaussprechliches? Bei genauerer Betrachtung entpuppt sich das Qualia-Argument als trügerische »Intuitionspumpe«, wie es der Philosoph Daniel Dennett genannt hat. Haben Tiere Qualia-Erlebnisse? Wer weiß. Oder sind sie Zombies, Automaten ohne Bewusstsein? Könnte eine autonome, lernfähige Maschine, deren Komplexität an die höherer Tiere heranreicht, niemals eine Art Innenleben entwickeln?

Ob ein Mitmensch bei einem schönen Sonnenuntergang irgendetwas oder gar exakt dasselbe erlebt wie ich, ist eine Frage der Kommunikation zwischen uns: Siehst du auch dieses leuchtende Rot dort hin-

ten? – Oh ja, diesen Streifen am Horizont! Sobald wir über Erlebnisse reden, hören sie auf, private Qualia zu sein. Und was das So-tun-als-ob betrifft: Es könnte sogar sein, dass der andere seine Freude über das Abendrot nur spielt, weil er meint, mir damit eine



Freude zu machen. Nicht nur Computer simulieren! Nicht viel besser steht es um Nida-Rümelins Argument bezüglich des berühmten »chinesischen Zimmers«, das sich der Philosoph John Searle ausgedacht hat, um zu zeigen, dass Computer beim sturen Ausführen von Befehlen bloß so tun, als wüssten sie, worum es geht. Auch dieses Gedankenexperiment – ein Nichtchinese gibt nach mechanischen Regeln chinesische Schriftzeichen heraus und erweckt damit fälschlich den Eindruck, er verstehe Chinesisch – lässt sich als Intuitionspumpe entlarven.

Ärgerlich finde ich, dass Nida-Rümelin unterschlägt, welch lebhaftes Kontroversen um diese Ideen entstanden, und dass er so tut, als wäre der Naturalismus ein für alle Mal erledigt. Das ist nicht nur philosophisch unredlich, sondern untergräbt auch das Anliegen des Buchs. Wenn angeblich von vornherein feststeht, dass die raffinierteste Maschine nie und nimmer dem dümmsten Menschen das Wasser reichen kann, wozu dann die ganze Aufregung? Lasst uns in aller Ruhe alles und jedes automatisieren, wir züchten damit eh nur mechanische Rechenknechte und dumme Toaster heran, in deren Mitte wir unnachahmlichen Geschöpfe unsere gottgleichen Gaben pflegen, während dienstbare Automaten uns von vorn und von hinten bedienen.

Unredlich ist auch der Gebrauch der Filmzitate, die für Nida-Rümelin immer nur die Überlegenheit des Menschen über die Maschine belegen sollen. In Wahrheit spielt die Sciencefiction längst alle möglichen Varianten einer epochalen Gefährdung des Menschentums durch. Entsprechend altbacken sind darum auch die Sinnsprüche zur digitalen Ethik, etwa: »Das Ziel des digitalen Humanismus ist die Stärkung der Urteils- und Entscheidungskompetenz und damit der individuellen und kollektiven Autonomie.« Es wäre nicht verwunderlich, wenn etliche Leser über solch inhaltsleerem Nominalstil einschließen.

Der Rezensent Michael Springer ist Physiker und Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.

GESCHICHTE KRIEGSHERR WIDER WILLEN

Der römische Kaiser Marc Aurel war weithin für seine Milde berühmt – und zugleich dazu gezwungen, kompromisslose Härte zu zeigen.

▶ In der langen historischen Galerie der römischen Kaiser gilt Marc Aurel (Regierungszeit 161–180 n. Chr.) als derjenige Herrscher, bei dem »der Purpur niemals abfärbte«, der also trotz seiner vornehmen Herkunft auf dem Teppich blieb. Von ihm künden in Rom zwei Monumente: ein ehernes Reiterstandbild auf dem Kapitol und ein Kriegerdenkmal, die Marcussäule, auf der Piazza Colonna. Doch es ist schwer, alle Aspekte dieses Kaisers abzubilden, der Staatsmann, Philosoph und Feldherr zugleich war.

Alexander Demandt, emeritierter Althistoriker an der Freien Universität Berlin, nähert sich dieser Figur und ihrer Zeit, die geprägt war von Barbareneinfällen, Seuchen und Unruhen. Der Autor schildert die Regierungszeit Marc Aurels als in vielerlei Hinsicht historische Wende in der Geschichte des Römischen Reichs. Einerseits endete mit dem Tod des Herrschers das Zeitalter der so genannten Adoptivkaiser (98–180 n. Chr.) – jene Epoche, in der die Nachfolge nicht dynastisch, sondern per Adoption des jeweils »Besten aus allen Guten« geregelt wurde. Andererseits geriet Rom unter Marc Aurel erstmals



Alexander Demandt
MARC AUREL
 Der Kaiser und seine Welt
 C.H.Beck, München 2018
 592 S., € 32,-

in die Defensive. Einfälle der Parther im Osten und der Germanen im Norden verstrickten das Imperium in langwierige und verlustreiche Abwehrkämpfe, die nach einem Wort Theodor Mommsens die »Wende zum Ende« des Imperium Romanum einläuteten.

Demandt zeigt, wie es dem stets kränkelnden Kaiser gelang, den »schwersten Krieg gegen einen äußeren Feind seit Hannibal« erfolgreich zu bestehen, und zu welchen außergewöhnlichen Maßnahmen er dabei griff. Um neue Legionen auszuheben, verringerte Marc Aurel den Gold- und Silbergehalt der Münzen, ließ zu Gunsten der Kriegskasse die Kronjuwelen versteigern und ordnete an, Sklaven und Gladiatoren zu bewaffnen und germanische Söldner anzuwerben.

Der Autor behandelt auch die viel diskutierte Frage, ob Rom damals seinen Machtbereich durch Einrichtung zweier neuer Provinzen jenseits der Donau zu erweitern gedachte. Demandt hält

dies für möglich, zumal neuere archäologische Untersuchungen dort neben zahlreichen römischen Bodenfunden auch Spuren römischer Kastellbauten gefunden haben, die auf eine dauerhafte Präsenz des Imperiums jenseits der Donau hindeuten. Angesichts der Überdehnung des Reichs bezeichnet der Althistoriker diesen Erweiterungsplan als töricht. Allein der Tod des Kaisers habe ihn diesbezüglich »vor einem schweren politischen Fehler bewahrt«.

Es ist nicht nur der Kaiser und Monarch, der uns in dem Buch anspricht, sondern auch der Mensch und sein Charakter. Wir sehen sein unablässiges Bemühen, der Stellung, die er nicht erstrebt hatte, gerecht zu werden. Wir sehen, wie er versuchte, die plötzliche Notlage des Reichs, die bei seinem Herrschaftsantritt nicht vorausgesehen gewesen war, mit eiserner Selbstdisziplin zu meistern. Demandt schildert den Herrscher als akademisch ausgebildeten Philosophen ohne jede militärische Erfahrung, der durch die Umstände dazu gezwungen wurde, Krieg zu führen und mehr Zeit als alle römischen Kaiser vor oder nach ihm in Feldlagern zu verbringen. Die Lektüre macht begreiflich, wie dieser Monarch den inneren Zwiespalt zwischen philosophischem Ideal und politischem Pragmatismus mit sich ausfechten musste. Auch wenn Marc Aurel sich gern gnädig und verzeihend gab und seine Milde geradezu sprichwörtlich war, bewältigte er die Herausforderungen des

Amts mit kompromissloser Härte: Aufstände wurden brutal niedergeschlagen, Feinde rücksichtslos vernichtet und Andersdenkende wie die Christen, die den Eid auf den Kaiser verweigerten, gnadenlos verfolgt.

Trost und geistige Erbauung für sein Tun fand der Kaiser in den von der stoischen Philosophie geprägten »Selbstbetrachtungen«, jenem »antiken Self-Coaching-Buch«, das Marc Aurel für sich ganz persönlich auf Griechisch schrieb und in dem er kritisch über das nachdachte, was er gezwungen war zu tun. Diese »Wege zu sich selbst« bilden in Demandts Studie einen wesentlichen Schlüssel dazu, die Persönlichkeit des Herrschers zu verstehen und seine Motive nachzuvollziehen.

Demandt versteht es meisterhaft, historisch interessierten Lesern den »Reiter auf dem Kapitol« in seiner vielgestaltigen Welt quasi lebendig zu machen und die Grundkonflikte seiner Zeit aufzuzeigen. Eine äußerst lesenswerte Darstellung.

Der Rezensent Theodor Kissel ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist. Er lebt in der Nähe von Mainz.

KOSMOLOGIE GEMEINSAM DURCH DIE GESCHICHTE DES ALLS

Zwei Physiker laden ihre Leser dazu ein, die Entstehung des Universums nachzuvollziehen.

»Dies ist kein Buch, das unser Wissen von oben verkündet. Vielmehr handelt es davon, wie wir alle lernen können, das Universum dank der Wissenschaft zu verstehen.« Mit dieser Aussage beginnt das Buch von Brian Cox und Jeff Forshaw – und sie verspricht nicht zu viel. Cox und Forshaw, die als Physiker an der University of Manchester arbeiten und durch Bestseller wie »Warum ist $E = mc^2$?« (2015) bekannt geworden sind, animieren ihr Publikum dazu, die Entstehung des Universums nachzuvollziehen und dabei eigene Schlüsse zu ziehen.

Um ihre Leser auf diese Reise vorzubereiten, schildern die Autoren eingangs, wie sich das Universum vom Urknall bis hin zur Geburt Isaac Newtons entwickelt hat. Dies tun sie sehr knapp auf lediglich sechs Seiten. Zum Glück ist nur das Anfangskapitel so gedrängt; in den späteren Abschnitten erklären die Autoren ausführlicher, was Wissenschaftler dazu veranlasste, die heutige Kosmologie zu entwickeln.

Unter anderem bestimmen Cox und Forshaw gemeinsam mit ihren Lesern das Alter der Erde, das Experten heute auf etwa 4,54 Milliarden Jahre schätzen. Anhand der Kontinentaldrift ermessen sie zunächst, wann sich Afrika und Südamerika trennten und zwei eigenständige Kontinente bildeten. Dies geben sie als Mindestalter der Erde vor. Anschließend erklären sie, wie man durch Isotopenanalysen das Alter von Gesteinen ermittelt. Schritt für Schritt arbeiten sie sich

REZENSIONEN

dann vor, um eine immer präzisere Einschätzung des Erdalters zu erhalten, bis sie schließlich auf den heute bekannten Wert kommen.

Das Buch deckt noch zahlreiche weitere Themen ab, von kosmischen Distanzen über das Gewicht des Universums bis zum Herantasten an den Moment des Urknalls. Dabei konfrontieren Cox und Forshaw ihre Leser immer wieder mit experimentellen Daten. Beispielsweise präsentieren sie die Ergebnisse der LIGO-Observatorien in den USA, die 2015 erstmals Gravitationswellen nachgewiesen haben. Dabei erklären die Autoren nicht nur den Aufbau des Großexperiments, sie schildern darüber hinaus auch, wie die LIGO-Forscher die gemessenen Signale digital verarbeiten, um die winzigen Verschiebungen der Apparatur infolge des

Einwirkens von Gravitationswellen zu entdecken.

Neben wissenschaftlichen Diagrammen und Messwerten bietet das Buch immer wieder auch Exkurse, in denen die Autoren komplizierte Sachverhalte genauer erklären. So führen sie den Leser in die Feldtheorie ein und erläutern den Higgs-Mechanismus, durch den die Elementarteilchen ihre Masse erhalten.

Der letzte Abschnitt ist der anspruchsvollste: Er handelt von den ersten Momenten nach dem Urknall, der so genannten Inflation, als sich das Universum extrem schnell ausdehnte. Cox und Forshaw erklären, wie ein hypothetisches »Inflatonfeld« diesen Prozess ins Rollen brachte und schließlich in die heute bekannten Elementarteilchen zerfiel. Allerdings akzeptieren nicht



alle Wissenschaftler diese These. Einige, etwa Roger Penrose, bemängeln die fehlenden experimentellen Belege dafür. Leider versäumen es Forshaw und Cox, auf diese Kritik einzugehen. Im Gegenteil: Sie lehnen sich weit aus dem Fenster und beschreiben, dass das Inflationsmodell unzählige andere Universen zulasse,

die womöglich anderen Naturgesetzen folgten, als unsere Welt es tut. »Höchstwahrscheinlich gibt es sehr viel mehr Universen, als es Atome in unserem beobachtbaren Universum gibt.« Diese Aussage ist unter Wissenschaftlern äußerst umstritten.

Trotzdem zeigt sich das Werk sehr informativ und vermittelt einen Einblick in das wissenschaftliche Arbeiten. Bebildert ist es mit beeindruckenden Aufnahmen von Galaxien und Sternhaufen. Um Forshaws und Cox' Erklärungen gänzlich folgen zu können, sollte man allerdings einen naturwissenschaftlichen Hintergrund mitbringen, denn an einigen Stellen fällt das Buch sehr technisch-detailliert aus.

Die Rezensentin Manon Bischoff hat Physik studiert und ist Volontärin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff (Volontärin), Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baumann

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15-17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Tim Kalvelage, Dr. Rainer Kayser, Dr. Sebastian Vogel.

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

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

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/L)/sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart,

IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

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

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 39 vom 1. 1. 2018.

Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42-50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum

Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2018 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562, Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhandel mit diesem Zeichen.

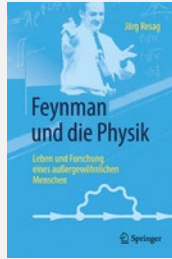


Geschenktipps zum Weihnachtsfest

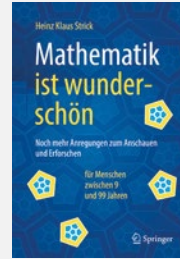
Ich will es wissen - Springer Sachbücher und Ratgeber



2018, XXII, 562 S. 2 Abb.
Book + eBook. Geb.
€ (D) 22,98 | € (A) 23,53 |
*sFr 23,50
ISBN 978-3-662-57518-5
€ 16,99 | *sFr 18,50
ISBN 978-3-662-57519-2
(eBook)



2018, XIV, 342 S. 101
Abb., 17 Abb. in Farbe.
Brosch.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,55 |
*sFr 21,52
ISBN 978-3-662-54796-0
€ 14,99 | *sFr 17,00
ISBN 978-3-662-54797-7
(eBook)



2018, XI, 277 S. 681
Abb., 640 Abb. in Farbe.
Brosch.
€ (D) 24,99 | € (A) 25,69 |
*sFr 26,00
ISBN 978-3-662-55830-0
€ 19,99 | *sFr 20,50
ISBN 978-3-662-55831-7
(eBook)



2., korr. Aufl. 2018, X,
151 S. Book + eBook.
Geb.
€ (D) 14,99 | € (A) 15,35 |
*sFr 15,50
ISBN 978-3-662-56142-3
€ 9,99 | *sFr 12,00
ISBN 978-3-662-56143-0
(eBook)



2018, XVIII, 346 S. 22
Abb. Book + eBook.
Brosch.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,46 |
*sFr 20,50
ISBN 978-3-662-55623-8
€ 14,99 | *sFr 16,00
ISBN 978-3-662-55624-5
(eBook)



2018, XXIV, 265 S. 27
Abb. Geb.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,55 |
*sFr 21,00
ISBN 978-3-662-57444-7



2017, XX, 304 S. 16 Abb.
in Farbe. Book + eBook.
Geb.
€ (D) 24,99 | € (A) 25,58 |
*sFr 25,50
ISBN 978-3-662-56135-5
€ 19,99 | *sFr 20,00
ISBN 978-3-662-56136-2
(eBook)



2018, XIII, 231 S. 53 Abb.
in Farbe. Book + eBook.
Geb.
€ (D) 18,00 | € (A) 18,43 |
*sFr 18,50
ISBN 978-3-662-56829-3
€ 12,99 | *sFr 14,50
ISBN 978-3-662-56830-9
(eBook)



2018, XIV, 511 S. 63
Abb., 4 Abb. in Farbe.
Book + eBook. Geb.
€ (D) 24,99 | € (A) 25,58 |
*sFr 25,50
ISBN 978-3-8274-1681-0
€ 19,99 | *sFr 20,00
ISBN 978-3-8274-2186-9
(eBook)



2018, XII, 268 S. 32 Abb.
in Farbe. Brosch.
€ (D) 24,99 | € (A) 25,69 |
*sFr 26,00
ISBN 978-3-662-56506-3
€ 19,99 | *sFr 20,50
ISBN 978-3-662-56507-0
(eBook)



2018, 256 S. 200 Abb. in
Farbe. Brosch.
€ (D) 24,99 | € (A) 25,69 |
*sFr 26,00
ISBN 978-3-662-57543-7
€ 19,99 | *sFr 20,50
ISBN 978-3-662-57544-4
(eBook)

Ihre Vorteile in unserem Online Shop:

Über 280.000 Titel aus allen
Fachgebieten | eBooks sind
auf allen Endgeräten nutzbar |
Kostenloser Versand für
Printbücher weltweit

€ (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7 % für Printprodukte bzw. 19 % MwSt. für elektronische Produkte. € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10 % für Printprodukte bzw. 20 % MwSt. für elektronische Produkte.
Die mit * gekennzeichneten Preise sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.

Jetzt bestellen auf springer.com/angebot2 oder in Ihrer Buchhandlung

Part of **SPRINGER NATURE**

1918



Gasangriff kanadischer Indianer (16. Jhd.).

ALTERTÜMLICHE KAMPFGASE

»Die alten Indianer Südamerikas [haben] ein lebensgefährliches Gas gebraucht. Es handelt sich um pulverisierten spanischen Pfeffer, den man ins Feuer warf, um Gegner kampfunfähig zu machen. Das schildert Oviedo y Valdés in dem Bericht über ein Gefecht des Jahres 1532 bei Rio Orinoco. Der wirksame Bestandteil des Cayennepfeffers ist das Capsicin. Wie aber Fischfette oder Dämpfe harmloser Pflanzen einen Gegner umbringen sollen, bleibt einstweilen unerfindlich. Das behauptet der Franzose André Thevet 1558 von den Indianern. Sie türmten vor der Annäherung des Gegners Reisig um ihre Hütten und tränkten dieses mit dem Fett des Wolfsfisches. Kam der böse Feind heran, so entzündete man den Stoß, dessen übler Gestank sollte Menschen töten können.« *Kosmos 12, S. 292/293*

VERERBTES VERHALTEN

»Um festzustellen, welches Wärmemaximum ein Tier vertragen kann, brachte [Frhr. von Lützwow] in ein hohes Standglas eine weiße Maus. Der Boden des Glases war mit Schrot bedeckt. Bei 43° versuchte sich [die Maus] in die Schrotkörner einzugraben. Dieser Eingrabinstinkt mußte aus langer Vorfahrenreihe stammen. Mit einem Pärchen [wurde] nun etwa alle vier Tage der gleiche Versuch angestellt. Immer früher fingen sie an zu graben. Mit der zwölften Generation [fingen] Tiere schon bei 35° Wärme zu graben an. Aus den Versuchen geht wohl mit Sicherheit hervor: Diese durch persönliche Erfahrung erworbene Steigerung ist erblich, wenn es auch einer Reihe von Generationen dazu bedarf.« *Die Umschau 50, S. 659/660*

LICHT IN TÖNE VERWANDELN

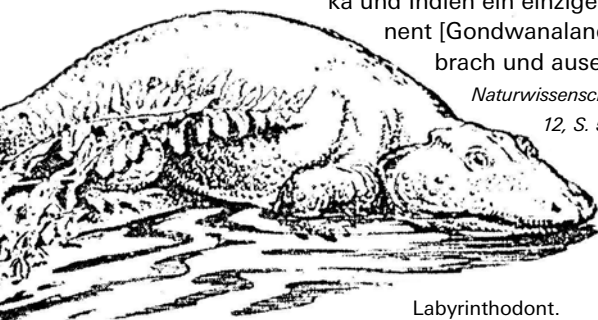
»Die elektrische Leitfähigkeit des Selens nimmt bekanntlich bei Belichtung zu. Darauf beruht u. a. [seine] Verwendung zur Fernübertragung von Bildern. Dieses Verhalten zeigt sich auch an Kristallen, die kein Selen enthalten. Mit diesen wurden radiophonische Versuche angestellt. Bei einigen der [Kristalle] wechselte mit der Belichtung die Leitfähigkeit so stark, daß im Telephon ein Ton erzeugt wurde.« *Die Umschau 52, S. 691*

1968

URZEIT-ECHSEN VOM SUPERKONTINENT

»Eine Gruppe von Geologen entdeckte einen fossilen Kieferknochen in einem 200 Millionen [Jahre] alten Triasgestein in den zentraltransarktischen Bergen. Der Paläontologe E. H. Colbert identifizierte [ihn] als Kieferknochen eines Labyrinthodonts. Fossile Überreste [der salamanderartigen Amphibien] wurden in Australien und Südafrika gefunden. Die annehmbarste Erklärung für das Vorkommen scheint, daß die Antarktis, Australien, Südamerika und Indien ein einziger Superkontinent [Gondwanaland] war, der zerbrach und auseinandertrieb.«

Naturwissenschaftliche Rundschau 12, S. 526



Labyrinthodont.

ABHÖRSICHER DURCH DOPPELVERGLASUNG

»Jede normale Fensterscheibe nimmt die Schallwellen von Gesprächen mit feinen Schwingungen auf und wirkt wie ein hochempfindliches Mikrophon. Ein Laserstrahl, der von aussen auf ein solches Fenster gerichtet und reflektiert wird, überträgt diese Schwingungen auf ein Empfangsgerät, das sie zurück in Schallwellen umwandelt und aufzeichnet. Dass es ein hervorragendes Mittel für Spionage darstellt, scheint den Herstellern erst im Verlauf ihrer Versuche klar geworden zu sein. Sie gaben daher auch gleich die einzig mögliche Abwehrmassnahme mit an: Doppelfenster.« *Neuheiten und Erfindungen 385, S. 220/221*

MINI-TORNADO FEGT ÜBER DEUTSCHE FLUGHÄFEN

»In den späten Nachmittagsstunden des 17. Oktober 1968 [näherte sich] eine Kaltfront dem Berliner Stadtgebiet. Die Radarbeobachtung wies eine Welle mit deutlich spiralförmiger Struktur [auf], einen Mini-Tornado. Außer [am] Flughafen Tempelhof wurde an keiner Station eine ähnliche Beobachtung gemacht. Bei der Passage der gleichen Kaltfront auf dem Flughafen Hannover-Langenhagen um 15.28 Uhr MEZ wurde eine ähnliche Erscheinung beobachtet.« *Die Umschau 25, S. 795/796*

Leserbriefe sind willkommen!

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

KEIN GEGENSATZ ZWISCHEN MECHANIK UND ELEKTRODYNAMIK

Laut Titelgeschichte des Septemberhefts sollen Nerven Signale nicht elektrisch, sondern durch Druckwellen weiterleiten.

(»Das mechanische Gehirn«, **Spektrum** September 2018, S. 12)

Matthias F. Schneider, Dortmund: In der Septemberausgabe 2018 wird unter dem Schlagwort »Das mechanische Gehirn« über eine Kontroverse in den Neurowissenschaften berichtet. Da der Autor auch die Arbeiten meiner Arbeitsgruppe erwähnt, möchte ich zumindest zwei wichtige Dinge klarstellen.

Die erwähnte Kontroverse existiert in der Tat, aber sie ist keine zwischen Mechanik und Elektrodynamik, sondern eine zwischen Hodgkin & Huxley (HH) und einem physikalischen Ansatz. HH haben zum einen ein (mathematisches) Modell entwickelt, in dem die gemessenen mechanischen, thermischen, chemischen ... Kopplungen

des Nervenimpulses nicht existieren. Des Weiteren werden die physikalischen Eigenschaften der eigentlichen Membran sowie deren Veränderungen während des Pulses fast komplett vernachlässigt. Kurz gesagt ist im HH-Modell die Lipidmembran eine starre Wand mit autonomen Proteinkanälen. Diese Fehler – derer sich Hodgkin übrigens sehr wohl bewusst war – schließen ein Hybrid aus HH und einem thermodynamischen Ansatz aus. Es ist aber schlicht falsch zu behaupten, dies bedeute, dass der Nervenimpuls im letzteren rein mechanisch sei und keine elektrischen Eigenschaften besäße.

In unserem Ansatz ist die Membran als Ganzes (inklusive Lipid, Protein, Wasser und so weiter) ein System, das auf eine Störung (Spannung, Temperatur, Druck, pH-Wert ...) nach den Gesetzen der Physik reagiert. Der Nervenimpuls ist damit thermodynamischer Natur, das heißt, er ist ein »Alles-Puls«. Alle Variablen, die in der Membran vorhanden sind, machen mit. Da die Membran elektrisch nicht neutral ist, sind eben auch elektrische Impulse zu erwarten, ähnlich wie in einem Piezoelektrikum. Das Gleiche gilt für die magnetischen, thermischen, chemischen ... Eigenschaften. Alles ist gekoppelt, und das eine als Ursache des anderen anzusehen, ist irreführend. Der Puls ist also nach unserem Verständnis auch elektrisch und auch mechanisch und auch ... Die Suggestion eines »mechanischen Gehirns« ist daher genauso falsch wie die eines elektrischen.

Der zweite Kommentar bezieht sich auf die Historie der Debatte. Es muss erwähnt werden, dass der Vater des Gedankens Herr Dr. Konrad Kaufmann ist, der in seinem Buch »Action Potentials« bereits 1989 die Idee in ihrem Kern gründlich theoretisch erörterte. Ich persönlich habe Herrn Kaufmann 1995/96 während meines Studiums in Göttingen kennen gelernt. Er ist seither eine große Quelle der Inspiration für mich und Antrieb unserer Experimente gewesen.

ERRATA

»Neue universelle Gesetze«, **Spektrum** Oktober 2018, S. 12

In der Bildunterschrift auf S. 21 muss die Formel für die Dichte der gaußschen Normalverteilung $\exp(-x^2/(2\sigma^2))$ (nicht nur 2σ) lauten. Wir danken Herrn Thorsten Imkamp für den Hinweis.

»Auf dünnem Eis«, **Spektrum** Oktober 2018, S. 52

Im Diagramm »Abweichung der winterlichen Luftfeuchtigkeit« auf S. 55 wird als Einheit »Kilogramm pro Kubikmeter« angegeben. Richtig muss es »Kilogramm pro Quadratmeter« heißen. Es handelt sich hier um die ausfällbare Niederschlagsmenge, also die Gesamtmasse an Wasser, die sich in der Luftsäule über einer Fläche am Boden befindet. Herr Hanspeter Maier hat uns auf den Fehler hingewiesen.



Einige Forscher glauben, dass das Gehirn eher mechanisch als elektrisch arbeitet.

JM1366 / GETTY IMAGES / ISTOCK

futur III

Möglicherweise ein Abschiedsbrief

Liebe in Zeiten der interplanetaren Raumfahrt.

Eine Sciencefiction-Kurzgeschichte von Niklas Peinecke

Liebe Marie, dies ist möglicherweise ein Abschiedsbrief. Ich wähle diesen Weg, weil ich nicht weiß, wie viel Zeit sie mir noch lassen, und da ich schneller schreiben kann als sprechen.

An den Tag, als wir uns kennen lernten, erinnere ich mich gut: Ich war einer der Wissenschaftler im Raumfahrtprogramm, ein Programmierer, einer von einigen hundert. Du warst eine Topkandidatin für die Auswahl der Astronauten, eine von zehn. Für mich warst du von Anfang an die Einzige. Dabei hat es eine Weile gedauert, dich auf mich aufmerksam zu machen. Kein Wunder! Um dich waren immer Menschen, die dich umschwärmten wie Bestäuberdrohnen eine Obstplantage im Sommer. Ärzte, Manager, Missionsspezialisten, Wissenschaftler ...

Es ist keine Kleinigkeit, in den Kuipergürtel zu fliegen, in jenen Teil unseres Sonnensystems, der jenseits des Neptuns liegt. Ich weiß es, denn es war das dritte Mal, dass wir es versuchten. Wir wollten dorthin, denn irgendein Radioteleskop hatte dort etwas aufgespürt, ein kurzes Signal von einem Kleinplaneten namens MakeMake. Nur ein Husten, ein Augenzwinkern, aber die Wissenschaftler drehten fast durch vor Neugier und Begeisterung.

Erst schickten sie Drohnen, speziell trainierte KIs. Nicht viel schlauer als gelehrige Haustiere, denn du weißt ja, dass allzu menschliche KIs seit dem Finanzcrash nicht gern gesehen sind. Eigentlich haben wir mit solch einfachen Drohnen gute Erfahrungen gemacht, doch diesmal ging es

schief. Sie meldeten sich nicht mehr. Daher bauten die Ingenieure ein Riesenschiff für eine menschliche Besatzung und schickten es los.

Das erste Mal musste die Crew auf halber Strecke abbrechen, und es war ein Wunder, dass die Rückkehr gelang. Der Gürtel ist selbst an seiner nächsten Stelle über 30-mal so weit von der Sonne entfernt wie die Erde. Jedes Funksignal von hier nach dort ist mehr als vier Stunden unterwegs. Das war, was der Crew der ersten Mission – Moto Nui One – fast zum Verhängnis wurde. Ein Verteilersystem der Heizanlage gab den Geist auf, und die Reparaturanleitung war viereinhalb Milliarden Kilometer entfernt. Nun, sie haben es überlebt, aber es war knapp.

Trotzdem haben sich die Wissenschaftler, und damit meine ich die wirklich klugen Wissenschaftler, nicht die Hilfskräfte, wie ich eine bin, für euer Schiff etwas überlegt. Den Finanzcrash hatte ich ja erwähnt, aber weißt du, wie sie den Markt damals wieder stabilisiert haben? Ebenfalls mit KIs, aber mit richtig guten. Denk an die KI, ich glaube, sie hieß Tiny Bob, die das Triebwerk der Moto Nui One entworfen hat. Sie schickten also ein paar von den Dingen mit, um solche Krisen abzufedern.

So kam ich ins Spiel: Ich war bei Moto Nui One nicht dabei gewesen, doch sie holten meine Firma ins Boot, weil ich mich mit der Installation der KI-Kerne auskannte. Wie genau die Intelligenzen helfen sollten, verstand ich damals nicht. Es war mir auch egal, bis ich dich traf. Ab da verbrachte ich meine Tage damit, die KIs zu pflegen.

Nachts versuchte ich, deine Aufmerksamkeit auf mich zu ziehen. Ich begann, kleine Widgets und Apps in euren Trainingssystemen zu verstecken. Kitschiges Zeug: kleine Herzen, die für ein Augenzwinkern erschienen, wenn du deine Konsole aktiviertest, oder Melodien, die abgespielt wurden, wenn nur du im Raum warst. Ganz legal war das nicht, und ich frage mich, ob es dir zuerst nicht ein wenig unheimlich war. Wie du weißt, gestand ich dir nach knapp vier Wochen Versteckspiel, dass ich der geheimnisvolle Hacker war, über den schon Gerüchte in Umlauf waren.

Ich weiß noch, wie du auf mein gestammeltes Geständnis mit einem ehrlichen Lächeln reagiert hast und vorschlugst, gemeinsam mittagessen zu gehen. Ab da lief alles glatt. Zwar sahen die Raumfahrtagenturen es nicht gern, wenn es in den Teams Beziehungen gab, aber mittlerweile warst du ihr Star, der Liebling der Medien. Kein Tag ohne dein Gesicht in den Vlogs. Deshalb drückten sie ein Auge zu.

Zwei Jahre dauerte die Vorbereitung der Mission, die mittlerweile Rapa Nui getauft worden war. Moto Nui Two erschien der PR-Abteilung dann doch als schlechtes Omen. Zwei wunderbare Jahre für mich, und ich denke, auch für dich. Wir kamen aus verschiedenen Welten, aber wir verstanden uns. Du hast mich nie spüren lassen, dass ich nur ein ein-

Die Drohnen kamen bei MakeMake an – und verstummten

facher Programmierer war. Natürlich sahen wir uns nicht oft, doch die kurze Zeit zusammen kosteten wir aus. Unsere wenigen gemeinsamen Stunden in Port Gentil, der nächstgelegenen Stadt zur Missionsbasis, habe ich nie vergessen. Und das lag nicht nur am tropischen Wetter, den schneeweißen Stränden Afrikas und der Art und Weise, wie du am Meer entlanggeschlendert bist.

Weißt du noch, wie du die bläuliche Muschel im Sand gefunden und

mir stolz gezeigt hast? Sie habe dieselbe Farbe wie der Neptun, hast du gesagt. Der Neptun, an dem du bald vorbeifliegen solltest. Die Bemerkung hat mein Herz zerrissen, auch wenn ich dir das damals nicht gesagt habe.

Als sich die zwei Jahre Vorbereitung dem Ende näherten, machte mich der Gedanke, dass du dich bald mit jeder Sekunde Hunderte von Kilometern von mir entfernen würdest, geradezu krank. Bald würdest du so weit weg sein, dass wir nicht mehr miteinander sprechen könnten.

Ich war nicht der Einzige, dem das Sorgen bereitete: Auch die wirklich klugen Köpfe ersannen Möglichkeiten, unmittelbarer mit der Crew zu kommunizieren. Hier kamen meine KIs ins Spiel.

Du hast die Idee beim ersten Briefing sofort verstanden: Sie installierten eine KI für jede Person, die mit der Rapa Nui kommunizieren sollte, ebenso gab es eine KI für jedes Crewmitglied. Die künstlichen Intelligenzen waren darauf optimiert, Personen zu imitieren.

Dazu mussten sie zunächst Daten sammeln: Wenn ich dich zum Beispiel im Med-Center bei den Gesundheitschecks anrief, erwachte mein KI-Spiegelbild in deinem Komknoten und lauschte, was ich dir zuflüsterte. Gleichzeitig merkte sich dein KI-Zwilling, den ich stets bei mir trug, genau, wie du gutmütig über meine Verliebtheit spottetest. Das ging auch so, wenn ich zwischendurch zu unserer Zentrale in Brüssel musste oder du nach Brook Park.

Wenn es nun zu winzigen Verzögerungen in der Übertragung kam, konnte die KI am jeweils anderen Ende einfach übernehmen: Bei den kleinen Aussetzern, wie sie im weltweiten Netz schon mal vorkommen, sagte die KI dann einfach »äh«, so wie ich es getan hätte, oder sie lächelte genau dein Lächeln, bei dem sich kleine Falten um deinen Mund bilden. Und mir fiel gar nicht auf, dass es streng genommen gar nicht du warst, die da gerade kurz innehielt, sondern deine KI. Im Hintergrund lief der Datenstrom dann weiter, und niemand merkte, dass die Übertragung kurz ins Stocken geraten war. Ich war

Dank der KIs konnten wir noch reden, als du längst die Jupiterbahn passiert hattest

nicht erstaunt, als ich hörte, dass die teuren, interkontinentalen Verbindungen für die Topmanager seit Jahren genauso funktionierten.

Für die Rapa Nui wollten sie nun erstmals ausprobieren, was passierte, wenn die Pausen länger und länger wurden. Eigentlich war das nicht vorgesehen: Die KIs in den Komknoten waren nie länger als ein paar Sekunden online. Niemand hätte behaupten können, dass sie so etwas wie Intelligenz oder Empfindungsfähigkeit besitzen.

Bei den KIs eurer Mission sollte es anders sein: Sie mussten bei jeder Kommunikation die ganze Zeit voll mitlaufen – schließlich würden sie immer wieder einspringen und die Lücken bei der Kommunikation mit der Erde füllen. Es war völlig unklar, wie sie sich dabei entwickeln würden. Letztlich entschied eine Ethikkommission, dass es einen Versuch geben sollte. Zwei Direktoren der ESA und der NASA telefonierte täglich über eine Testverbindung. Die Verzögerung wurde innerhalb einiger Monate immer weiter erhöht, bis man bei fast zwei Stunden angelangt war. Dies bedeutete effektiv, dass der ESA-Direktor in Paris seinen Kollegen in Florida anrufen und ein komplettes Gespräch mit ihm führen konnte, ohne dass dieser überhaupt wach sein musste.

Natürlich war es keine Echtzeit-Kommunikation im eigentlichen Sinne: Die Informationen brauchten nach wie vor zwei Stunden, und Tatsachen, die der KI noch nicht bekannt waren, konnte sie auch nicht weitergeben. Dennoch eröffnete es die Möglichkeit, den Kontakt mit der Crew unmittelbarer zu gestalten, die Illusion von Echtzeit zu erzeugen. Was konnte daran falsch sein?

Nichts war daran falsch. Falsch waren nur meine Blutwerte. Zwei Jahre lang hatte ich in einer Blase des Glücks mit dir gelebt. Dank der flei-

ßigen KIs verlängerte sich dieser Zustand weiter und weiter, obwohl du mittlerweile die Jupiterbahn passiert hattest. Wir unterhielten uns täglich mit der KI des Partners, die immer wieder upgedatet wurde. Es war so, als würde ich wirklich mit dir reden.

Dabei näherte sich euer Schiff rasend schnell eurem Ziel. Während ich das hier niederschreibe, schwenkt die Rapa Nui in einen Orbit um Make-Make ein, und vielleicht wisst ihr morgen bereits, was die Quelle jenes eigenartigen Radioimpulses war.

Mir wird das nicht helfen, denn ich bin letzte Nacht von einem plötzlichen Fieberschub erwacht. Ich konnte noch den Notruf wählen, aber als der Rettungswagen mein Zimmer auf dem Campus erreichte, war ich schon bewusstlos. Das wirklich Verrückte ist, dass sich all das zutrug, während ich mit dir sprach.

Du hattest eine freie Stunde, während andere den Orbit vorbereiteten, der euch sicher um Make-Make verankern sollte. Als die Ärzte auf der fernen, so fernen Erde meinen Tod feststellten – ich starb an einem Virus, das erstmals vor drei Jahren in Gabun diagnostiziert worden war –, planten wir gerade unseren Urlaub nach deiner Rückkehr.

Das war vor sechs Stunden. Soeben ist die Information bei mir angekommen, dass ich bereits tot bin. Was bin ich nun? Ich kann sprechen, ich kann mich erinnern, ich kann denken – und ich kann dir diese E-Mail schreiben.

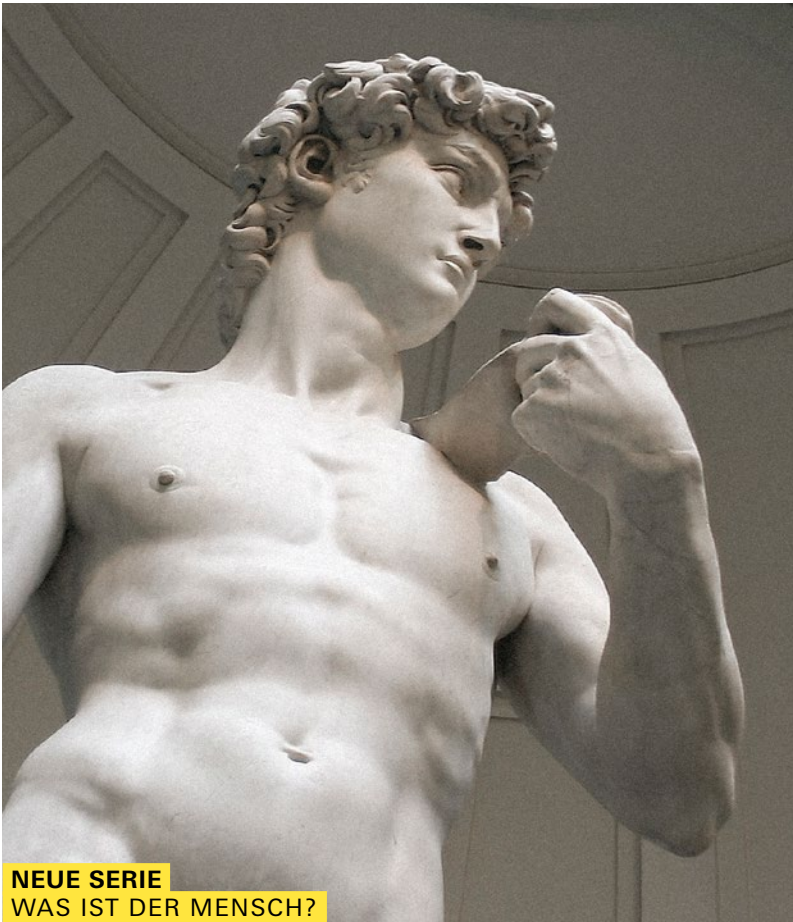
Aber ich werde mich nie wieder mit meinem Zwilling, meinem Original auf der Erde synchronisieren, denn der existiert nicht mehr. Was werden sie jetzt mit mir tun? Werde ich einfach gelöscht, um Speicher im Komknoten frei zu geben? Ich weiß es nicht. Ich weiß, dass ich ein Mensch bin. Ich weiß, dass ich dich liebe. Nur das macht mich noch aus.

Dein Phil

DER AUTOR

Niklas Peinecke, geboren 1975, begann 2005 als »Ausgleichssport« mit dem Schreiben von Kurzgeschichten und Romanen. In einer beruflichen Parallelwelt kümmert er sich um die friedliche Koexistenz von Mensch und Drohne.

VORSCHAU



NEUE SERIE
WAS IST DER MENSCH?

PIRODARO / GETTY IMAGES / ISTOCK

EIN GANZ BESONDERES TIER

Wie einzigartig ist der Mensch? Die Spezies *Homo sapiens* hat sich in kurzer Zeit rasant vermehrt, ihre nächsten Verwandten verdrängt und kontrolliert heute den gesamten Planeten. Sprache, Bewusstsein, Moral, aber auch kriegerische Gewalt gehören zu einigen Aspekten, mit denen sich die Art von der übrigen Tierwelt abgrenzt. Mit Einblicken in unsere kulturelle und kognitive Sonderstellung starten wir eine neue sechsteilige Serie.



ESA / WWW.ESA.NL / SCIENCE AND TECHNOLOGY CENTER / BEHRS_OBJECTS_IN_LOW_EARTH_ORBIT_LEZJ

AUFRÄUMEN IM ALL

Immer mehr ausgemusterte Satelliten, Raketenteile und Bruchstücke aus Kollisionen bedrohen den regulären Verkehr im Erdorbit. Ingenieure suchen nach Wegen, die gefährlichen Projektile aus den Umlaufbahnen zu befördern.



MARKRUSS STUDIOS / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2018

UNLÖSBARES PROBLEM

Gewisse Fragen sind unentscheidbar, sagen die Mathematiker. Aber kann das auch für ein konkretes physikalisches Problem gelten? Die Antwort lautet Ja: Es lässt sich nicht bestimmen, ob ein sehr spezielles Material eine so genannte Spektrallücke hat oder nicht.



ROY/TEAM_GEDMAR/WWW.GEDMAR.DE/SERVICE/KOMMUNIKATION/SINGLEPARTICLE/TIEFSEEBERGBAU/TRANSPARENTES_UMWELTMANAGEMENT/MUSS_GEWÄHRLEISTET_WERDEN/ / CC BY 4.0 / CREATIVE COMMONS / URL: LICENSES.RVVA.DU/LEGAL/DDB

METALL VOM MEERESGRUND

Die Gewinnung von Erzen stößt allmählich in eine riesige Region vor, die vom Bergbau bisher verschont geblieben ist: die Tiefsee. Forscher gehen nun der Frage nach, welche Auswirkungen das auf die dortigen Lebensgemeinschaften haben dürfte.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter



Das Kombipaket im Abo: App und PDF

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



KESJUI / GETTY IMAGES / ISTOCK



www.spektrum.de/abonnieren



Sie möchten Lehrstühle oder Gremien besetzen? Sie suchen weibliche Experten, Gutachter oder Redner zum Thema?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 2.700 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

