

Spektrum

der Wissenschaft

Die Grenzen der Quantenwelt

Neue Experimente
erschließen ein seltsames
Zwischenreich

8,50 € (D/A/L) - 14,- sFr. D66179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN

DIE JUNGE ERDE Bedingungen für Leben gab es früher als gedacht
PALÄOGENETIK Streit um DNA-Analyse in der Archäologie
KREBS Stammbäume von Tumoren deuten auf Schlüsselgene



Jetzt abonnieren!

**Spektrum
PSYCHOLOGIE** –
Das Magazin für
den modernen,
selbstbestimmten
Menschen



AUSGABE 2/18 JETZT
IM HANDEL ERHÄLTlich!

Spektrum PSYCHOLOGIE bringt Ihnen ab sofort alle zwei Monate tiefere Einsicht in das menschliche Miteinander, mehr Orientierung in aktuellen gesellschaftlichen Fragen sowie positive Impulse für Ihr eigenes Leben:
kompakt und informativ.

Verpassen Sie kein Heft und lesen Sie 6 Ausgaben im Jahresabonnement mit einem Preisvorteil von fast 12 % gegenüber dem Einzelkauf!

Informationen und Bestellmöglichkeit:

www.spektrum-psychologie.de

Telefon: 06221 9126-743 · Mail: service@spektrum.de



EDITORIAL SCHRÖDINGERS BÄRTIERCHEN

Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Ein Tier steht seit 1935 symbolhaft für die Rätsel der Quantenphysik: Schrödingers Katze. Der österreichische Physiker wollte mit einem Gedankenexperiment Ideen von Werner Heisenberg und anderen Kollegen ad absurdum führen. Ihnen zufolge kann sich ein quantenmechanisches System in einer Überlagerung verschiedener Zustände befinden, bei einem radioaktiven Atom zum Beispiel »zerfallen« und »nicht zerfallen«. Sobald jemand nachmisst, findet er jedoch entweder den einen oder den anderen Zustand; folglich müsse der Messvorgang als solcher den Kollaps der vorherigen »Superposition« verursachen. Diese Vorstellung empfand der Nobelpreisträger des Jahres 1933 als Zumutung.

Seine imaginäre Katze verfrachtete er in eine verschlossene Kiste. In deren Innern sorgt eine Apparatur dafür, dass ein Kolben mit tödlicher Blausäure zerbirst, sobald ein Atom einer radioaktiven Substanz zerfällt. Schrödinger bezeichnete das Ganze in seinem Originalaufsatz als »Höllmaschine«, durch die gemäß Heisenbergs Theorie die lebende und die tote Katze in der Kiste miteinander »verschmiert« existieren. Das aber könne ja wohl niemand im Ernst glauben. Schlimmer noch: Wenn jemand den Kasten öffnet und die Katze darin tot ist, wäre das Nachschauen gleichsam die Todesursache.

Indem er den mikrophysikalischen Prozess des Atomzerfalls in seinem fiktiven Versuch auf die makrophysikalische Ebene unserer Alltagswelt hob, adressierte Schrödinger neben dem »Messproblem der Quantenmechanik« noch eine weitere bis heute umstrittene Frage: Gelten die seltsamen Gesetze der Quantenmechanik womöglich nur bis zu einer bestimmten Größenordnung? Wie wir ab S. 12 berichten, schicken sich Physiker an, genau dies endlich experimentell zu entscheiden. Und wieder soll ein Tier eine zentrale Rolle spielen. Nein, keine Katze, aber immerhin das mikroskopisch kleine Bärtierchen!

Die Grenzen zwischen Realität, Gedankenexperiment und Sciencefiction verschieben sich bisweilen. Das war ein Grund dafür, dass wir vor zwei Jahren die Rubrik Futur III (siehe S. 96) ins Leben riefen. Jetzt gibt es Anlass zur Freude: Unser Autor Uwe Hermann wurde für seine Erzählung »Das Internet der Dinge« (*Spektrum* Juni 2017) mit dem renommierten Kurd Laßwitz Preis für Sciencefiction ausgezeichnet. Wir gratulieren!

Herzlich grüßt
Ihr



NEU AM KIOSK!

Wie Menschen einst dachten, fühlten und glaubten, erfahren Sie in unserem Spektrum Spezial Archäologie – Geschichte – Kultur 2.18.

AUTOREN DIESER AUSGABE



JEFFREY P. TOWNSEND

Der Evolutionsbiologe untersucht ungewöhnliche Abstammungslinien: Er stellt Tumorstammbäume von Patienten auf, um herauszufinden, wann ein Krebs zu streuen anfängt (S. 36).



DAVID G. STORK, AYDOGAN OZCAN, PATRICK R. GILL

Eine Kamera oder ein Mikroskop ohne Linsen? Das geht, wenn man die Lichtstrahlen nicht durch Brechung miteinander mischt, sondern rechnerisch im Computer. Die drei Autoren haben die zugehörigen Algorithmen geschrieben (S. 66).



GEORG SCHMIDT

Wenn halb Europa am Dreißigjährigen Krieg beteiligt war, muss man dann nicht von einem europäischen Krieg sprechen? Eine einfache Antwort darauf gibt es laut dem Jenaer Historiker nicht (S. 82).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Jupiters Nordpol

Tonnenschwerer
Kopfschmuck

Galaxien ohne Sterne

Bienen mit Zahlensinn

DNA-Schwamm gegen
tumorfördernde RNA

Dünen auf Pluto

Nano-Saturn
aus 234 C-Atomen

Aggressive Guppys
wechseln die Augenfarbe

24 FORSCHUNG AKTUELL

**Woher stammt
die Antimaterie?**

Neuen Messungen zufolge
eher von Dunkler Materie.

Grüne Wasserwaage

Wie schaffen es Pflanzen,
derart präzise entgegen der
Schwerkraft zu wachsen?

**Wunschobjekt
auf Knopfdruck**

Neue Materialien für
den 3-D-Druck.

**Zirkulation im
Nordatlantik schwächt**

Schmelzwasser bremst
Meeresströmungen.

35 SPRINGERS EINWÜRFE

Von Daten zu Taten

Intransparente Algorithmen
reproduzieren Vorurteile.

50 ZEITREISE

Von der Erdöl-Vinaigrette
zum LSD

64 SCHLICHTING!

**Zugleich diffus
und spiegelnd**

Verschiedene Reflexionen
kommen oft gemeinsam.

12 PHYSIK **AN DER GRENZE ZUR QUANTENWELT**

Wie gehen Quantenobjekte in unsere klassische Welt über, und was bedeuten die Vorgänge für unsere Vorstellung von Realität? Im Labor suchen Forscher nach Antworten.

Von Tim Folger

18 QUANTENGRAVITATION **EIN STÜCKCHEN SCHWERKRAFT**

Neue Experimente sollen zeigen, ob die Gravitation wie alle übrigen Wechselwirkungen quantisiert ist.

Von Natalie Wolchover

36 MEDIZIN **TUMOR MIT STAMMBAUM**

Metastasen auslösende Mutationen geschehen viel früher als vermutet. Hier können neue Therapieansätze angreifen.

Von Jeffrey P. Townsend

44 GESCHLECHTERFORSCHUNG **DIE LEGENDE VOM WEIBLICHEN GEHIRN**

Menschliche Gehirne ähneln eher Mosaiken aus männlichen und weiblichen Merkmalen.

Von Lydia Denworth

52 PRÄHISTORIE **ZANKAPFEL PALÄO-DNA**

Genomanalysen bereichern die Erforschung der Frühgeschichte – und entfachen Konflikte zwischen Archäologen und Genetikern.

Von Ewen Callaway

58 ASTROGEOLOGIE **STREIT UM DIE FRÜHE ERDE**

Neue Serie: Die junge Erde (Teil 1) Gab es wirklich den Asteroidenhagel, der die Erde vor knapp vier Milliarden Jahren heimgesucht und alles Leben ausgelöscht haben soll?

Von Adam Mann

66 TECHNIK **REVOLUTIONÄRE KAMERAS**

Neuartige Fotosensoren kommen ohne Linsen aus. Algorithmen berechnen aus Beugungs- und Interferenzmustern gestochen scharfe Bilder.

Von David G. Stork, Aydogan Ozcan und Patrick R. Gill

74 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **KOMPLEXE SCHÖNHEITEN**

Elias Wegert zeigt die wesentlichen Eigenschaften von Funktionen komplexer Zahlen in farbenfrohen »Phasenporträts«.

Von Christoph Pöppe

82 GESCHICHTE **WAR DER DREISSIGJÄHRIGE KRIEG EUROPÄISCH?**

Serie: Der Dreißigjährige Krieg (Teil 3) Was als Aufstand in Böhmen begann, erfasste etliche europäische Staaten. Warum spricht man dennoch meist von einem deutschen Krieg?

Von Georg Schmidt

KYSIMAGE / GETTY IMAGES / ISTOCK



12

TITELTHEMA
DIE GRENZEN
DER QUANTENWELT

CNRI / SCIENCE PHOTO LIBRARY



36

MEDIZIN
TUMOR MIT
STAMMBAUM



58

ASTROGEOLOGIE
STREIT UM
DIE FRÜHE ERDE

NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER CONCEPTUAL IMAGE LAB / BENNIU'S JOURNEY - EARLY EARTH (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/GSFC/15636699388/) / CC BY 2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/2.0/LEGALCODE)

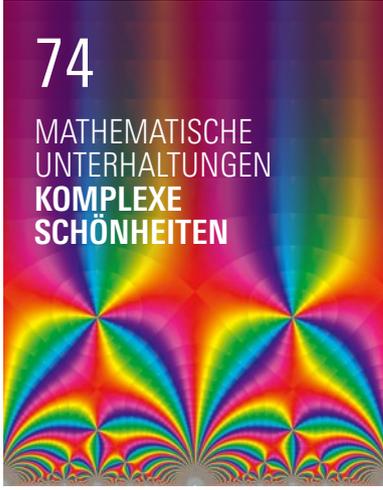
LUCHSCHEN / GETTY IMAGES / ISTOCK



66

TECHNIK
REVOLUTIONÄRE
KAMERAS

ELIUS WIEGER, WWW.VISUAL.WIEGER.COM



74

MATHEMATISCHE
UNTERHALTUNGEN
KOMPLEXE
SCHÖNHEITEN

81 FREISTETTERS FORMELWELT

Handwerk und hohe Kunst

Das ungleiche Paar aus Differenzieren und Integrieren.

86 REZENSIONEN

Dieter Braun:

Die Welt der Berge

David Gugerli:

Wie die Welt in den Computer kam

Hans-Ulrich Wiemer:

Theoderich der Große

Heinz Klaus Strick:

Mathematik

ist wunderschön

Günther Thomé:

Deutsche Orthographie

91 IMPRESSUM

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

Gesprächstherapie

Wenn Dienstleister mit ihrem Job hadern.

98 VORSCHAU

Titelbild: Jaswe / 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.

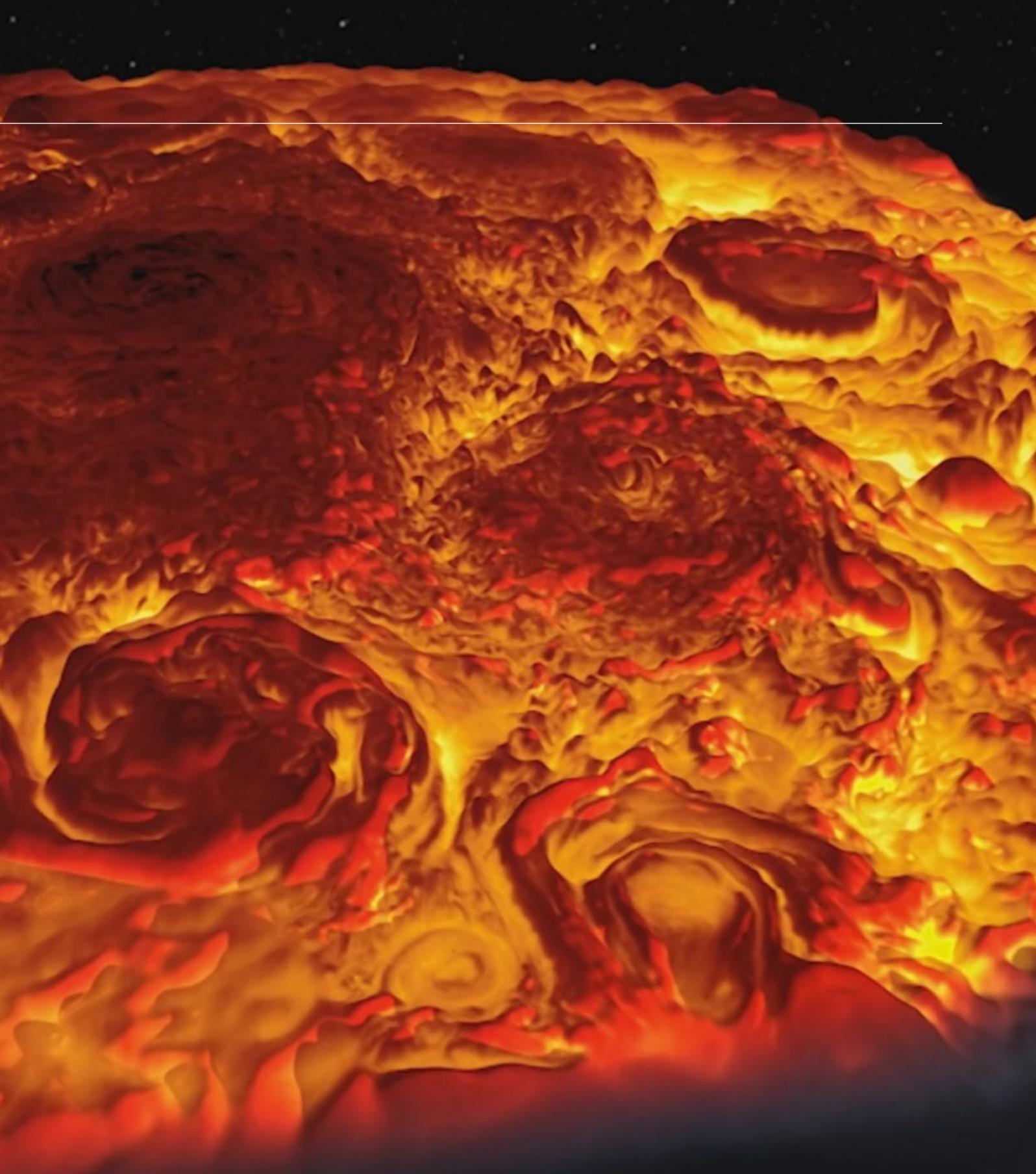
SPEKTROGRAMM

JUPITERS NORDPOL

► Nein, das ist keine Pizza im Ofen, sondern eine Infrarotaufnahme des Jupiters. Sie zeigt den Nordpol des Gasriesens und stammt von der Raumsonde Juno, die den Planeten seit 2016 immer wieder umrundet. Bei einem der Vorbeiflüge vermaßen die Wissenschaftler mit Hilfe der Spezialkamera JIRAM den Sturm, der dauerhaft über dem Pol des Gasplaneten tobt, wobei das Instrument Daten aus bis zu 70 Kilometer Tiefe erfasste.

Auf der 3-D-Rekonstruktion kann man klar erkennen, dass der gewaltige Wirbel von acht kleineren Zyklonen umgeben ist. »Klein« ist hierbei allerdings relativ zu sehen: Jeder dieser Wirbelstürme hat einen Durchmesser von gut 4000 Kilometern, würde auf der Erde also fast die gesamte USA bedecken. Aus den Farbtönen der Aufnahme lässt sich außerdem die Temperatur rekonstruieren: In gelben Regionen wird das Gas bei etwa minus 13 Grad Celsius umhergewirbelt, in roten Gebieten bei nur minus 83 Grad.

NASA-Mitteilung, April 2018



ARCHÄOLOGIE TONNENSCHWERER KOPFSCHMUCK

Die Moai-Statuen auf der Osterinsel »Rapa Nui« stellen bis heute ein großes Rätsel dar: Viele der grauen Kolosse tragen Kopfbedeckungen aus rotem Vulkanstein, die bis zu zwölf Tonnen schwer sind. Wie gelang es den Bewohnern einst, diese Hüte in zehn Meter Höhe zu hieven? Manche Archäologen gehen davon aus, dass es hierzu einer Gesellschaft mit tausenden, hierarchisch organisierten Arbeitskräften bedurfte. Einer verbreiteten Theorie zufolge richtete

Das »Parbuckling« entspricht einem einfachen Seilzug mit loser Rolle und erlaubt es daher, Kraft einzusparen.

sich diese Inselzivilisation letztlich durch ökologischen Raubbau selbst zu Grunde.

Ein Team aus Archäologen und Physikern meint allerdings, dass die Statuen auch mit deutlich weniger Aufwand errichtet worden sein könnten – und stützt damit eine alternative Theorie, der zufolge nie eine besonders bevölkerungsreiche Hochkultur auf Rapa Nui lebte.

Die Wissenschaftler um Sean Hixon von der Pennsylvania State University haben exakte 3-D-Modelle verschiedener Hüte erstellt und damit am Computer getestet, wie man die Steinzylinder am leichtesten bewegen konnte. Demnach könnten die Inselbewohner

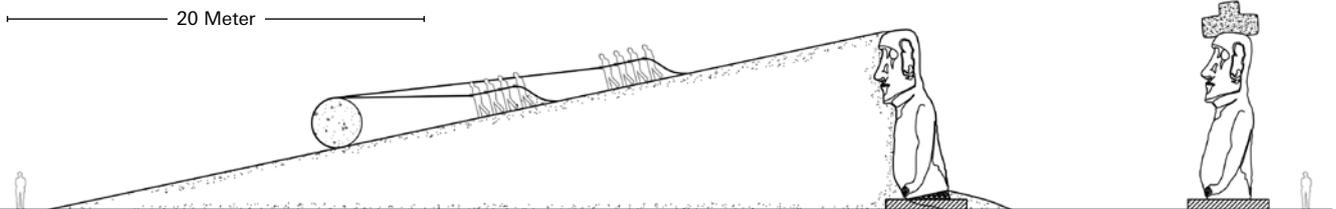


Unter der Last der Kopfbedeckung: Die Hüte der Moai-Statuen sind bis zu zwölf Tonnen schwer.

die Kopfbedeckungen mittels Rampen sowie einer aus der Seefahrt bekannten Seiltechnik auf den Statuen platziert haben. Bei dem sogenannten Parbuckling oder Aufschroten werden runde Körper auf Tauen gelegt und anschließend eine Rampe hinaufgezogen (siehe Bild). Mit dieser Technik hätten bereits 10 bis 15

Arbeiter genügend Kraft besessen, um die Hüte der Moais auf Kopfhöhe zu hieven, argumentieren die Forscher. Die monumentalen Großskulpturen könnten daher auch von kleineren, weniger komplex organisierten Gesellschaften errichtet worden sein.

J. Archaeol. Sci. 10.1016/j.jas.2018.04.011, 2018



ASTRONOMIE GALAXIEN OHNE STERNE

Forscher haben Hinweise auf Galaxien ohne Sterne gefunden. Astronomen gehen schon länger davon aus, dass es solche Objekte im All geben muss, zumal sie in Simulationen der Evolution des Kosmos auftauchen. Diese »dunklen« Galaxien hatten noch nicht genug Zeit, eine große Anzahl an Sternen zu bilden, und bestehen daher

vornehmlich aus kaltem Wasserstoffgas. Damit sollten sie viel zu schwach leuchten, um mit Hilfe von Teleskopen beobachtet werden zu können.

Einer Arbeitsgruppe um Raffaella Anna Marino von der ETH Zürich ist es nun dennoch gelungen, sechs plausible Kandidaten für diesen Typ von Sterninsel aufzuspüren. Sie sind bereits 1,7 Milliarden Jahre nach dem Urknall entstanden, vermuten die Forscher, also in der Frühphase des Kosmos. Damals wurden

die Exoten vom UV-Licht benachbarter aktiver Galaxienkerne (so genannter Quasare) beschienen, was den Wasserstoff in den dunklen Galaxien zum Leuchten anregte. Infolgedessen sandten die sternlosen Galaxien bis zu 1000-mal mehr Strahlung einer bestimmten Wellenlänge aus als gewöhnlich, was sie für heutige Teleskope sichtbar macht.

Die Entdeckung gelang mit Hilfe des MUSE-Spektrometers, das am Very Large Telescope in Chile

installiert ist. Das 2014 in Betrieb genommene Instrument liefert hochauflösende Bilder und zugleich genaue Spektralanalysen einer Lichtquelle. Erst das erlaubte es dem Team, die Dunkelgalaxien eindeutig als solche zu identifizieren. Anders als Vergleichsobjekte im Umfeld der beobachteten Quasare emittieren sie nämlich praktisch keine Strahlung anderer Wellenlängen, schreiben die Forscher.

Astrophys. J. 859, 1, 2018

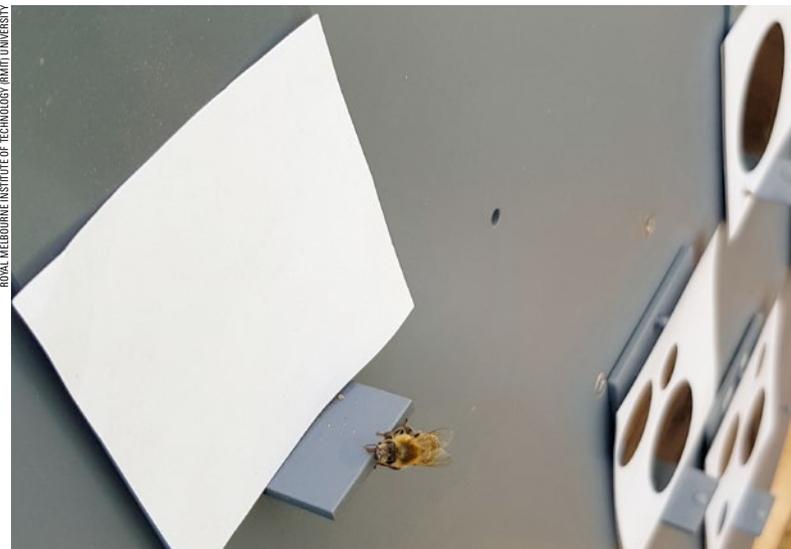
BIOLOGIE BIENEN MIT ZAHLENSINN

► Honigbienen können Zahlen zwischen eins und fünf der Größe nach ordnen und zeigen sogar ein Verständnis für die numerische Null, berichten Kognitionswissenschaftler um Adrian Dyer von der Monash University in Melbourne, Australien. In ihrer Untersuchung brachten die Forscher zehn Bienen zunächst bei, kleine von großen Zahlen zu unterscheiden. Dazu konfrontierten sie die Hautflügler mit zwei Schildern, auf denen jeweils zwischen ein und vier schwarze Punkte abgebildet waren. Flogen die Tiere das Schild mit weniger Punkten darauf an, erhielten sie einen

Schluck Zuckerlösung als Belohnung.

Später gingen die Wissenschaftler dazu über, auch Schilder ohne Punkte aufzustellen. Wie sich zeigte, flogen die Bienen die leere Menge bevorzugt an, ordneten sie also korrekt als kleinste Zahl ein. Selbst Artgenossen, die auf die Unterscheidung von Zahlen zwischen Zwei und Fünf trainiert worden waren, erkannten die Null als kleinste Zahl. Eine Kontrollgruppe, die auf das Anfliegen größerer Zahlen konditioniert worden war, beachtete das punktlöse Schild dagegen nicht in besonderem Maß.

Die Tiere scheinen auch einen Sinn für die Reihenfolge des numerischen Spektrums zu haben: Zwischen Null und Eins zu unterscheiden, fiel ihnen



Sie erkennen die Abwesenheit aufgemalter Punkte als »Null« und wissen die Zahl richtig einzuordnen: Bienen.

schwerer, als zwischen Null und Fünf zu differenzieren. Bisher waren Forscher davon ausgegangen, dass lediglich Wirbeltiere wie

Rhesusaffen, Graupapageien und Delfine über entsprechende Zählfähigkeiten verfügen.

Science 360, S. 1124–1126, 2018

MEDIZIN DNA-SCHWAMM GEGEN TUMOR- FÖRDERNDE RNA

► Mediziner möchten Krebszellen mit einem Gewirr von DNA-Schlingen austricksen. Der Schwamm

aus Genmaterial soll gezielt kurze RNA-Schnipsel abfangen, die sonst die Selbstverteidigungskräfte der Zellen gegen zunehmende Entartung stummschalten würden. Der neue Therapieansatz habe sich in ersten Versuchen an menschlichen Zellen sowie bei Versuchs-

tieren bewährt, berichten die chinesischen Wissenschaftler um Cheng Yang von der Nankai-Universität in Tianjin.

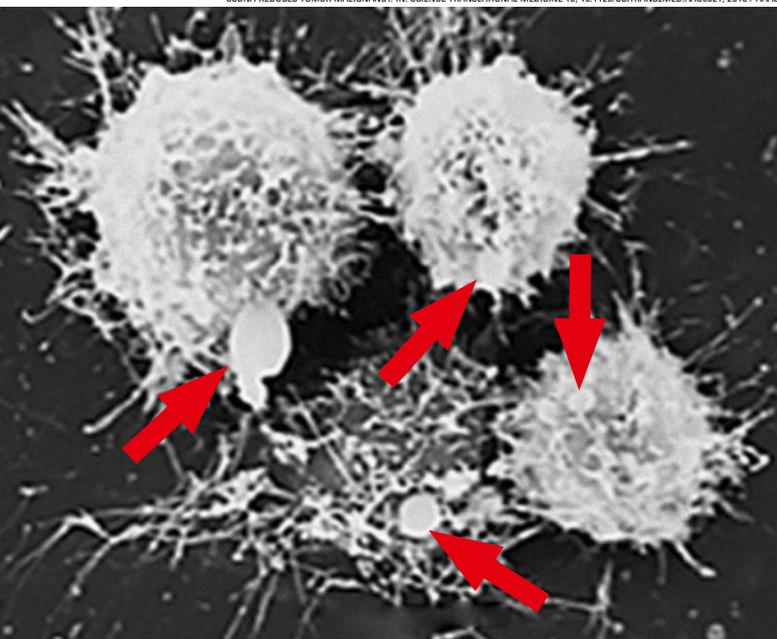
Der Angriff zielt auf microRNAs in Tumorzellen, die offenbar bei Lungen-, Brust- und Eierstockkrebs schützende Gene lahmlegen. Patienten, bei denen die kurzen RNA-Moleküle die Tumorsuppressorgene *KLF17*, *CDH1* und *LASS2* inaktivieren, haben eine schlechtere Prognose – der Bösartigkeitsgrad der Krebszellen nimmt dadurch zu. Statt wie andere Forscher zu versuchen, diese

Gene gezielt wieder anzuschalten, wollen die Wissenschaftler die TumormicroRNA stoppen, noch bevor sie wirken kann.

Dazu konstruierte das Team künstliche DNA-Einzelstrangringe, die an die microRNAs binden, und schleuste diese mit Hilfe von Nanopartikeln massenhaft in die Tumorzellen ein. Dort angekommen, inaktivierten die DNA-Konstrukte die microRNAs, wodurch die Tumorsuppressorgene aktiv blieben. Die Tumoren wuchsen daraufhin deutlich langsamer.

Sci. Transl. Med. 10, eaao6321, 2018

MENG, J. ET AL.: DEREPRESSION OF CO-SILENCED TUMOR SUPPRESSOR GENES BY NANOPARTICLE-LOADED CIRCULAR ssDNA REDUCES TUMOR MALIGNANCY. IN: SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE 10, 10.1126/SCITRANSLMED.AA06321, 2018 / AAAS



Künstliche DNA-Ringe fangen microRNAs, die normalerweise Tumorsuppressorgene abschalten. Die Gene bleiben dadurch aktiv, was in die Zerstörung der Krebszellen münden kann – im Rasterelektronenmikroskop erkennbar an den typischen Ausstülpungen der Zellen (Pfeile).

SONNENSYSTEM DÜNEN AUF PLUTO

► Auf der Erde entsteht reichlich Methan, großteils als Stoffwechselprodukt von Lebewesen. Auch auf dem Zwergplaneten

Pluto ist die Substanz in großen Mengen vorhanden, wie Wissenschaftler anhand von Spektroskopiedaten der Sonde New Horizons belegen können, die im Juli 2015 an Pluto vorbeigeflogen ist. Allerdings kommt der Kohlen-

wasserstoff dort nicht als Gas vor, sondern in Form gefrorener Körnchen, denn die Temperaturen liegen bei minus 230 Grad Celsius.

Offenbar haben sich die Methanpartikel hier und da sogar zu Dünen angehäuft, berichtet nun ein internationales Forscherteam um Matt W. Telfer von der britischen Plymouth University. Dafür sprächen parallele, gleichmäßig angeordnete Linien auf einigen Fotos der nordwestlichen Sputnik Planitia, die zum herzförmigen Areal Tombaugh Regio gehört. Die mutmaßlichen Dünen sind

Parallel verlaufende Strukturen auf Pluto sehen wie Dünen aus – und sind vielleicht auch welche, freilich solche aus Methan.

demnach dutzende Kilometer lang, wobei ihre Kämme zwischen 400 Meter und einem Kilometer auseinanderliegen.

Die Atmosphäre von Pluto ist viel dünner als die der Erde. Der Wind auf dem Zwergplaneten ist damit eigentlich zu schwach, um Partikel vom Boden aufzuwirbeln. Mit Computersimulationen konnten Telfer und seine Koautoren allerdings zeigen, dass die Methankörnchen beim Sublimieren von Stickstoffeis nach oben geschleudert werden. Einmal in der Luft, werden sie von Winden mitgeführt und fallen im Windschatten der kilometerhohen Wassereis-Berge am Rand von Sputnik Planitia wieder zu Boden, vermuten die Forscher.

Science 360, S. 992–999, 2018



NASA/JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY/SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE

CHEMIE NANO-SATURN AUS 234 C-ATOMEN

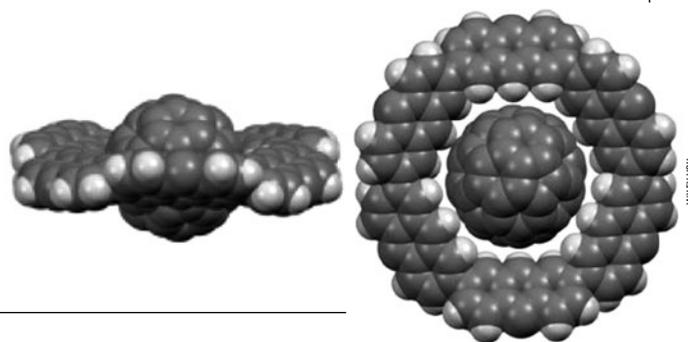
► Japanischen Chemikern ist es gelungen, zwei Kohlenstoffverbindungen zu einem stabilen Komplex zu vereinen, der dem zweitgrößten Planeten unseres Sonnensystems ähnelt: dem Saturn. Den Gasplaneten umgeben zahlreiche Ringe aus Eis- und Gesteinsbrocken. Der im Labor erzeugte Nano-Saturn enthält hingegen exakt 234 Kohlenstoffatome. Für den Körper des Planeten verwendeten die Forscher um Yuta Yamamoto vom Tokyo Institute of Technology ein so genanntes Fulleren, eine kugelförmige Modifikation des Kohlenstoffs, die wie ein Fußball aus regelmäßigen Fünf- und Sechsecken besteht. Als Ring diente eine zyklische Verbindung, basierend auf sechs Molekülen des organischen Kohlenwasserstoffs Anthracen.

Die Forscher hatten die Stabilität des saturnähnlichen Komplexes anhand von Berechnungen vorhergesagt. Es fehlte jedoch der experimentelle Nachweis, ein Fulleren mit einem flachen Ring tatsächlich erzeugen zu können. Bislang hatten Wissenschaftler es nur geschafft, eine Art molekularen Gürtel um die Kohlenstoffkugel zu legen. Der Clou der japanischen Gruppe: Sie verwendeten für den äußeren Ring Anthracen, in

dem drei Benzolringe in einer Ebene liegen. Sechs davon aneinandergesetzt bilden einen Kreis, in dessen Mitte genau ein Fulleren Platz findet.

Im Inneren der ringförmigen Struktur weisen 18 Wasserstoffatome vom Anthracen zur Mitte hin. Sie fixieren den Kohlenstoffball, indem sie mit den frei beweglichen Elektronen des Fulleren interagieren. Zwar sind die Wechselwirkungen nur schwach, in der Summe aber ausreichend, um einen stabilen Komplex zu erzeugen, was die Forscher mittels Röntgenstrukturanalyse und Kernspinresonanzspektroskopie nachgewiesen haben. Konkrete Anwendungsgebiete gibt es für den Nano-Saturn noch nicht, er könnte aber bei der Entwicklung funktionaler Materialien nützlich sein.

Angew. Chem-Ger Edit doi.org/10.1002/ange.201804430, 2018



WILEY-VCH

VERHALTENSFORSCHUNG

AGGRESSIVE GUPPYS WECHSELN DIE AUGENFARBE

► Guppys (*Poecilia reticulata*) wechseln blitzschnell die Farbe ihrer Iris, um Artgenossen zu signalisieren, sich besser von ihnen fernzuhalten, berichtet ein Team von der University of Exeter in Großbritannien. Schon vor einigen Jahrzehnten waren Wissenschaftler auf die zeitweise dunklen Augen der Süßwasserfische aufmerksam geworden.

Um das Phänomen genauer zu untersuchen, bastelten Robert Heathcote und seine Kollegen Roboter-guppys, die sie beliebig in Größe und Augenfarbe variieren und mit echten Tiere konfrontieren konn-

ten. Dabei schreckten Roboter mit schwarzer Iris kleinere Fische stärker ab als solche mit silbernen Augen, wie die Versuche ergaben. Bewachten die schwarzäugigen künstlichen Tiere nämlich schmackhafte Nahrung, trauten sich die echten Guppys seltener an sie und ihre Beute heran. Das umgekehrte Phänomen zeigte sich bei kleineren Roboguppys, die körperlich unterlegen wirkten. In deren Anwesenheit verdunkelten die echten Fische ihre eigene Iris und griffen die vermeintlich schwächeren Artgenossen häufiger an, um ihnen ihr Futter abspenstig zu machen. Offenbar signalisiert die schwarze Iris den Tieren, dass ihr Gegenüber besonders aggressiv ist und seine

Beute mit allen Mitteln verteidigen wird, interpretieren die Wissenschaftler ihre experimentellen Beobachtungen.

Curr. Biol. 28, S. R652–R653, 2018

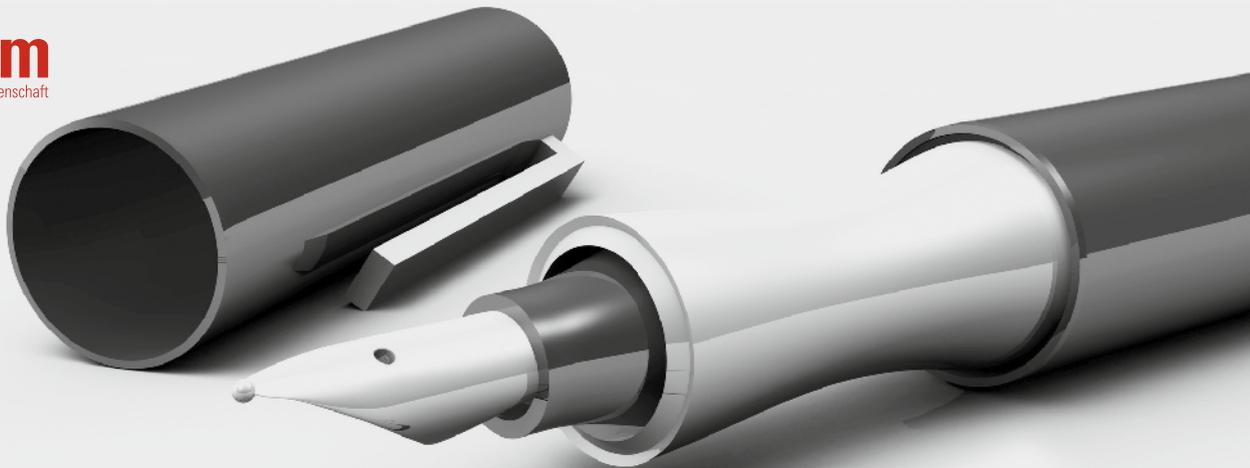
VINCENT EISFELD, VINCENT-EISFELD.DE (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:GUPPY_...
POECILIA_RETICULATA.JPG) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/4.0/LEGALCODE)



Schwarze Augen sind ein beliebtes Element in Horrorfilmen. Auch auf Guppys wirken sie offenbar bedrohlich.

ger an, um ihnen ihr Futter abspenstig zu machen. Offenbar signalisiert die schwarze Iris den Tieren, dass ihr Gegenüber besonders aggressiv ist und seine

Spektrum
der Wissenschaft



SCHREIBWERKSTATT

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

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

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

Telefon: 06221 9126-743 | service@spektrum.de
[spektrum.de/schreibwerkstatt](https://www.spektrum.de/schreibwerkstatt)

PHYSIK AN DER GRENZE ZUR QUANTENWELT

Auf Quantenebene gehorchen Objekte dem Zufall und bizarren Gesetzen. Unsere gewohnte Realität hingegen ist eindeutig und berechenbar. Wann und wie gehen beide Reiche ineinander über? Hoch präzise Experimente sollen endlich die Antwort geben.



Tim Folger ist Wissenschaftsjournalist und schreibt unter anderem für »National Geographic« und »Scientific American«.

» [spektrum.de/artikel/1573424](https://www.spektrum.de/artikel/1573424)

AUF EINEN BLICK WIE MÖGLICHES GEWISSHEIT WIRD

- 1** Quantenobjekte existieren nicht zwangsläufig in eindeutigen Zuständen – oft nehmen sie verschiedene gleichzeitig ein. Doch sobald man eine Messung durchführt, »entscheidet sich« das System für eine der Optionen.
- 2** Wie kommt es dazu, und was bedeuten die Vorgänge für unsere Vorstellung von Realität? Physiker haben dazu im Lauf der letzten Jahrzehnte diverse Theorien und Interpretationen entwickelt.
- 3** In Laborexperimenten gelangen zunehmend empfindliche Messungen an immer größeren Gegenständen. Indem Forscher Quantenphänomene auf sichtbaren Skalen hervorrufen, bauen sie eine Brücke zwischen Makro- und Mikrokosmos.

Irgendwie bringt ein Netzwerk subatomarer Objekte unsere kontinuierliche Wirklichkeit hervor. Der Mechanismus dafür ist unter Theoretikern umstritten.

▶ Simon Gröblacher ist ein Manipulator des Unsichtbaren. So entspricht die Länge eines der mechanischen Instrumente in seinem Labor an der Delft University of Technology kaum derjenigen eines Bakteriums. Doch sein Ziel ist es nicht, die Apparate weiter zu verkleinern – im Gegenteil. »Wir versuchen nun, richtig große Objekte zu bauen«, meint er, während er Pläne der Geräte auf seinem Computer aufruft. Für den Experimentalphysiker bedeutet »richtig groß« allerdings etwas, das mit bloßem Auge gerade noch zu erkennen ist. Auf diesen Skalen erhofft sich Gröblacher Antworten auf eine scheinbar widersinnige Frage: Kann sich ein einzelnes makroskopisches Ding von der Dimension eines Stecknadelkopfs an zwei Orten zugleich befinden?

Auf subatomarer Ebene ist so ein Zustand die Norm. Den seltsamen Regeln der Quantenmechanik zufolge haben Teilchen wie Elektronen oder Photonen keine eindeutigen Positionen, Energien oder andere klar bestimmte Eigenschaften – zumindest solange niemand hinschaut. Sie existieren in mehreren Zuständen gleichzeitig.

Unsere alltägliche Welt hingegen offenbart keinerlei Quantencharakter. Vom Virus an aufwärts manifestiert sich jeder Gegenstand stets an genau einer Stelle. Die Krux dabei: Wenn doch alles aus kleinsten Teilchen besteht, die Quanteneffekten gehorchen, warum merken wir im Alltag dann nichts mehr davon? Wo endet die Welt der Quanten, und wo beginnt die der klassischen Bewegungs-

gesetze? In den letzten Jahren stoßen Physiker wie Gröblacher mit immer empfindlicheren Laborversuchen in den Übergang von makroskopischer zu mikroskopischer Realität vor. Bislang kann niemand sagen, welchen Einfluss die Untersuchungen dieses Zwischenreichs haben werden. Sie könnten die Mysterien der Quantentheorie lösen oder vertiefen; auf jeden Fall eröffnen sie die Chance auf Einblicke in ein unbeschriftetes Feld der Physik.

Ungeachtet all ihrer Paradoxien ist die Quantenmechanik eine mächtige Theorie, deren Vorhersagen überwältigend gut zu den experimentellen Ergebnissen passen – in manchen Fällen auf ein Billionstel genau. Sie hat sich von der Biologie bis zur Astrophysik auf alle Facetten der Naturwissenschaft ausgewirkt. Gleichzeitig lässt sie uns notorisch im Stich, wenn es um das Wesen der Realität geht. Ihre Gleichungen weisen einem Objekt mittels so genannter Wellenfunktionen lediglich Wahrscheinlichkeiten zu, in einem bestimmten Zustand aufgefunden zu werden. Anders als bei der newtonschen Physik, wo Äpfel, Planeten und alle anderen Dinge jederzeit klar definierte Eigenschaften besitzen, regiert in der Quantenmechanik der Zufall.

Auf gewisse Weise existieren Teilchen, die durch Wellenfunktionen beschrieben werden, nicht wirklich. Das ändert sich völlig in dem Moment, in dem sie jemand vermisst – dann erhalten sie eindeutige Eigenschaften. Nicht nur lässt die Theorie unerklärt, wie der Akt der Beobachtung das zu Stande bringt; sie beantwortet außerdem nicht die Frage, warum sich dabei gerade diese eine Möglichkeit manifestiert statt irgendeiner anderen. Die Quantenmechanik verrät alles darüber, was passieren könnte, und sie sagt nichts darüber, was passieren wird.

Einer der Gründerväter der Theorie, Werner Heisenberg, bemühte in den 1920er Jahren gar eine geradezu metaphysische Begründung: Erst die Beobachtung lasse die Wellenfunktion »kollabieren« und reduziere so die Vielzahl der Optionen auf das gemessene Resultat. Der Haken daran ist, dass nichts in den Gleichungen der Quantentheorie einen solchen Kollapses vorsieht oder eine physikalische Erklärung für die Geschehnisse währenddessen liefert. Heisenbergs Lösung des einen Problems erzeugte ein anderes, das »Messproblem«.

Die meisten Physiker haben sich im Lauf der letzten 90 Jahre an die Idee des Kollapses gewöhnt, aber eigentlich mag sie niemand leiden. Die Implikation, erst eine menschliche Intervention vervollständige eine der fundamentalen Theorien des Universums, verträgt sich nicht mit der Vorstellung einer objektiven Realität. Entsprechend kommentiert der Nobelpreisträger Steven Weinberg von der University of Texas in Austin: »Aus einer idealen physikalischen Theorie sollte alles andere hervorgehen. Insbesondere sollte sie nicht den Menschen als Ausgangs- oder Bezugspunkt der Naturgesetze haben. Dennoch braucht die Quantenmechanik offenbar ein Postulat, das sich mit den Folgen einer bewussten Messung beschäftigt.«

Für jeden Geschmack gibt es einen Ansatz, doch keiner überzeugt vollends

Einen Kunstgriff, mit dem man um das Messproblem herumkommt, hat der im April 2018 verstorbene deutsche Physiker Dieter Zeh in den 1970er Jahren vorgeschlagen. Zeh nahm an, dass der Kollaps gar nicht stattfindet. Vielmehr entstünde nur der Eindruck, während sich die Wellenfunktion eines Objekts immer mehr mit all den Wellenfunktionen ihrer Umgebung verstricke (der Prozess wird in der Sprache der Quantenmechanik Verschränkung genannt). Es wäre jedoch schlicht unmöglich, alles davon im Auge zu behalten. Ein Beobachter bekäme bei einer Messung immer nur einen winzigen Teil der eigentlichen Quantenwelt zu sehen. Zeh nannte den Vorgang Dekohärenz. Viele Physiker beschreiben damit inzwischen, warum wir auf makroskopischer Ebene nicht Zeugen von Quantenphänomenen werden. Andere wenden ein, die Dekohärenz ließe das Messproblem ungelöst: Sie erkläre schließlich nicht, warum wir gerade diesen einen Zweig der zahllosen quantenmechanischen Optionen erkennen und nicht die anderen. Was zeichnet unsere Welt und ihre zeitliche Entwicklung vor allen anderen möglichen, aber nicht erlebbaren Pfaden aus?

Eine weitaus radikalere Lösung entstand bereits 1957 in der Doktorarbeit des Physikers Hugh Everett an der Princeton University. Er argumentierte, die Wellenfunktion müsse gar nicht kollabieren. Jede ihrer Komponenten sei vielmehr real und Teil einer sich unvorstellbar schnell verzweigenden Menge von Universen. Diese inzwischen Viele-Welten-Interpretation genannte Ansicht wird von einigen Kosmologen tatsächlich vertreten. Sie haben inzwischen zusätzliche Gründe gefunden, warum wir ihrer Ansicht nach in einem »Multiversum« leben sollten (siehe »Reise ins Quanten-Multiversum«, **Spektrum** September 2017, S. 12). Experimentell hat allerdings noch niemand

zwischen diesen und anderen Interpretationen der Quantenmechanik unterschieden. Das gilt auch für die vom französischen Physiker Louis de Broglie erdachten und vom US-Amerikaner David Bohm in den 1950er Jahren weiterentwickelten »Materiewellen«. Hier braucht es keinen Kollaps, weil die Wellenfunktion die Teilchen entlang kontinuierlicher Bahnen führt. Dieses Gedankengebäude ist unter Physikern heute eher randständig, aber mathematisch ebenso konsistent wie das übrige grobe Dutzend konkurrierender Interpretationen der Quantenmechanik. Letzten Endes wählen Wissenschaftler ihre Lieblingsbeschreibung der Realität allein anhand ästhetischer Gesichtspunkte.

Gröblachers Experimente könnten etwas mehr Ordnung in das Theoriegewirr bringen. Eines seiner »richtig großen« Objekte ist gerade eben noch mit bloßem Auge zu erkennen: eine Membran auf einem Siliziumchip. Sie erinnert an die Miniaturausgabe eines Trampolins (siehe »Der Quantentrampolin-Versuch«, S. 16) und besteht aus dem widerstandsfähigen Keramikmaterial Siliziumnitrid. In der Mitte ist ein Spiegel angebracht. Ein Bauteil auf dem Chip kann die Membran mit einem einzigen Stoß minutenlang in Schwingung versetzen. Sie ist ein hervorragender Oszillator, wie Gröblacher betont: »Das ist in etwa so, als würde man jemanden auf einer Schaukel anschubsen, und derjenige würde daraufhin zehn Jahre lang hin- und herschwingen.« Dabei ist die Membran extrem robust, erklärt Gröblachers Kollege Richard Norte: »Wir üben einen Druck von sechs Gigapascal aus, das ist etwa 10 000-mal so viel wie in einem Fahrradreifen. Und das bei einem Objekt, das lediglich achtmal dicker ist als ein Strang DNA.«

Die Membran vibriert bei Zimmertemperatur zuverlässig und eignet sich optimal, um mit ihr Quantenphänomene zu untersuchen. Gröblacher und Norte wollen sie mit einem Laser in eine »Superposition« versetzen, eine quantenmechanische Überlagerung, bei der die Membran auf zwei Weisen gleichzeitig oszilliert. Die über Minuten ungestörte Schwingung sollte prinzipiell lange genug andauern, damit man beobachten kann, wie der quantenmechanische Zustand der Membran in einen klassischen kollabiert.

»Wir haben die passenden Zutaten, um Quantenverhalten hervorzurufen«, kommentiert Gröblacher. »Wir wollen Wechselwirkungen mit der Umgebung möglichst vermeiden, brauchen also ein sehr gut isoliertes System. Wir versetzen es in einen Quantenzustand, und dann schalten wir unsere eigene Quelle für Dekohärenz ein, etwas, das wir kontrollieren können – einen Laser.« Noch könne Gröblacher die Schwingungen nicht in eine Superposition bringen, räumt der Physiker ein. »Doch in ein paar Jahren wollen wir so weit sein.« Sobald das erreicht ist, will er mit seinen Kollegen noch weitergehen und einen lebendigen Organismus als Passagier mit in den Überlagerungszustand verfrachten. Gröblacher möchte hierfür die widerstandsfähigen, mikroskopisch kleinen Bärtierchen verwenden. Doch das ist Zukunftsmusik. Der erste Schritt ist anspruchsvoll genug.

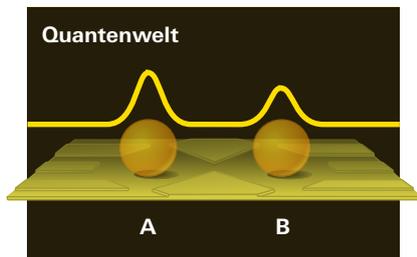
Falls es gelingt, könnte ein solches Experiment helfen, eine wichtige Frage zu klären: Gibt es in der Natur so

Zwei Wirklichkeiten

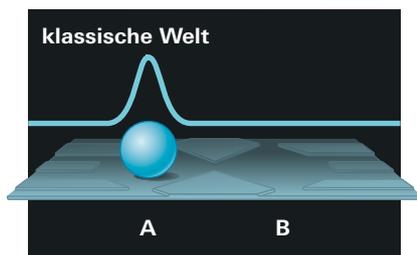
Die mikroskopische Welt gehorcht den seltsamen Regeln der Quantenmechanik, die makroskopische hingegen den gewohnten Bewegungsgesetzen. Forscher haben verschiedene Erklärungsansätze für den Übergang zwischen beiden Reichen entwickelt (siehe rechts).

Quantenwelt und klassische Realität

Einzelne Teilchen existieren nicht in eindeutigen Zuständen, sondern nehmen alle möglichen gleichzeitig ein. Die Theorie beschreibt Objekte darum mit so genannten Wellenfunktionen und ihren Überlagerungen («Superpositionen»). Die Amplituden einer Wellenfunktion liefern die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen in einem bestimmten Zustand aufzufinden – beispielsweise an Ort A oder B.

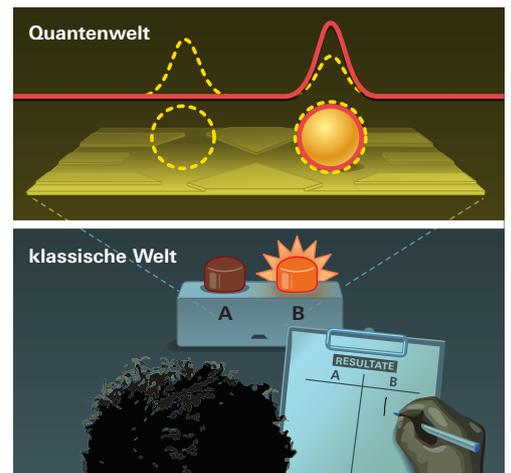


Sobald man misst, wo sich das Teilchen befindet, scheint es sich zufällig für eine der Optionen zu entscheiden. Man findet es dann etwa eindeutig an Position A. Es verlässt die Superposition und betritt die klassische Welt.



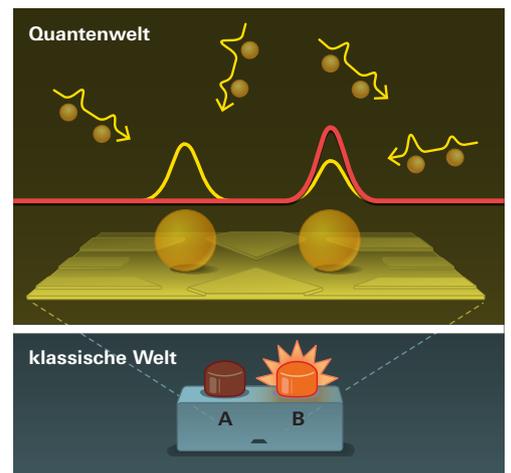
1 Kollaps bei der Messung

Laut einer der Interpretationen geht das System in ein klassisches über, sobald man es beobachtet. So lange man nicht genau hinschaut, liegt das Teilchen in einer Superposition vor (gelbe, gestrichelte Linien), doch im Moment der Messung legt es sich auf einen Zustand fest (rote Linie). Rätselhaft bleibt, was genau dabei passiert und warum die Rolle des Beobachters währenddessen so besonders ist.



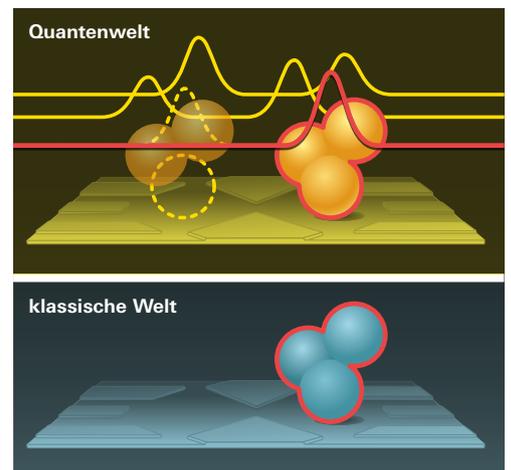
2 Dekohärenz

Bei einem alternativen Ansatz beeinflusst die Umgebung des Teilchens dessen Verhalten. Solange es ungestört bleibt, verharrt es in Superposition. Doch je länger und stärker die Wellenfunktionen nahe gelegener Objekte mit der Wellenfunktion des Teilchens interferieren, desto eher nimmt es einen eindeutigen, klassischen Zustand an.



3 CSL: Kontinuierliche spontane Lokalisierung

Die Wellenfunktion könnte auch unabhängig von einem Beobachter oder von Einflüssen der Umgebung plötzlich kollabieren. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist extrem gering, solange es sich um einzelne Teilchen handelt. Doch sobald viele zusammenkommen, wird zumindest eines davon irgendwann in die klassische Welt übergehen und könnte dann alle anderen mitnehmen.



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2018

etwas wie eine Zensur für Quanteneffekte jenseits einer gewissen Größenskala? Einige Physiker halten den Kollaps für ein reales Phänomen mit entsprechend messbaren Auswirkungen. Eines der zugehörigen theoretischen Konzepte wird als kontinuierliche spontane Lokalisierung bezeichnet (kurz CSL, nach dem englischen Begriff: continuous spontaneous localization). Sie behandelt den Kollaps der Wellenfunktionen als zufälliges Ereignis. Dessen Eintrittswahrscheinlichkeit ist für ein einzelnes Teilchen extrem niedrig, für eine große Ansammlung von Objekten aber so gut wie sicher.

Der theoretische Physiker Angelo Bassi von der Universität Triest illustriert das Konzept mit Zahlen: »Ein einzelnes Photon muss etwa 10^{16} Sekunden bis zum Kollaps warten, so etwas passiert in der Geschichte des Kosmos also nur selten. Bei einem makroskopischen Objekt hingegen, wie beispielsweise einem Tisch, der mehr als 10^{24} Teilchen enthält, kommt es praktisch sofort zum Kollaps.« Wenn CSL eine reale Bedeutung hat, wird der bewusste Akt der Beobachtung unwichtig. In jedem Versuchsaufbau werden die Teilchen und die überwachenden Gerätschaften zu einem Quantensystem, das rasch von selbst kollabiert. Nur scheinbar geschieht der Übergang von einer Superposition zu einem eindeutigen Ort während der Messung – tatsächlich legt bereits die erste Wechselwirkung den beobachteten Aufenthaltsort fest.

Subatomarer Poltergeist

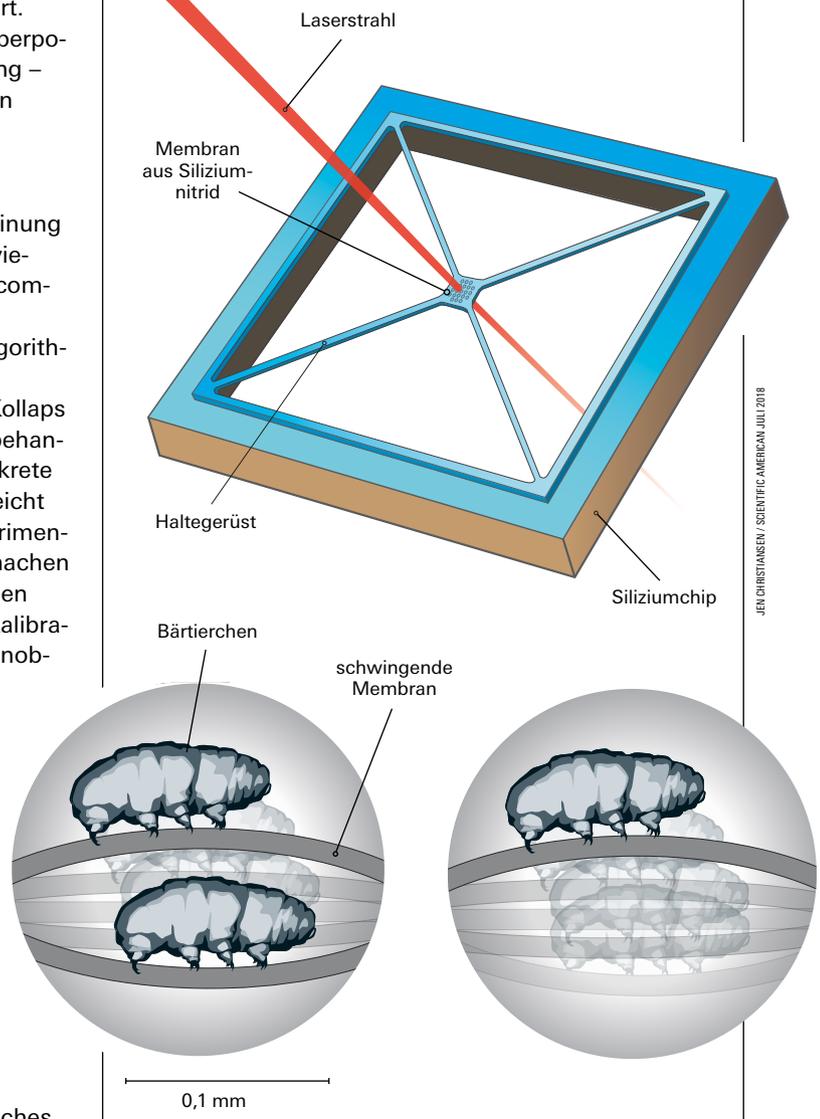
Sollte sich der Kollaps als reale physikalische Erscheinung erweisen, wären die praktischen Konsequenzen gravierend, beispielsweise für das junge Feld der Quantencomputer. »Hier will man immer größere Geräte bauen«, erläutert Bassi. »Doch darauf liefen keine Quantenalgorithmen mehr, weil der Kollaps alles zerstören würde.«

Jahrzehntlang haben die meisten Physiker den Kollaps als unüberprüfbar Aspekt der Quantenmechanik behandelt. CSL und ähnliche Modelle hingegen sagen konkrete Auswirkungen voraus. So könnte der Kollaps etwa leicht an den Teilchen rütteln, so dass sich in einigen Experimenten eine ständige Hintergrundvibration bemerkbar machen sollte. Bassi und andere Forscher suchen nach solchen Erscheinungen. Dazu haben sie unter anderem die Kalibrationsdaten des hochempfindlichen Gravitationswellenobservatoriums LIGO analysiert. Dessen Laser- und Spiegelsysteme reagieren noch auf Bewegungsänderungen, die dem 10 000sten Teil des Durchmessers eines Atomkerns entsprechen.

Im Februar 2016 hat das LIGO-Team die erste Entdeckung von Gravitationswellen verkündet. Zwei weit entfernte verschmelzende Schwarze Löcher hatten die Spiegel um Bruchteile eines Protonendurchmessers verschoben. Bassi und seine Kollegen haben in den Daten allerdings keine Hinweise auf zusätzliche Quantenstöße gefunden, wie sie die CSL-Interpretation vorhersagt. »Wenn man das Modell auf LIGO anwendet, sollte sich der Spiegel bewegen, doch das tut er kaum«, kommentiert Bassi. Falls der Kollaps ein reales physikalisches

Der Quantentrampolin-Versuch

Physiker möchten experimentell überprüfen, ob auch makroskopische Objekte unter geeigneten Umständen den Regeln der Quantenmechanik folgen. Bei einem geplanten Experiment wird eine Membran auf einem Chip in eine lang anhaltende Vibration versetzt. Ein Laserstrahl könnte sie in eine quantenmechanische Überlagerung zweier Schwingungszustände bringen. Anschließend beobachten die Forscher das Quantensystem dabei, wie es in eine eindeutige Amplitude übergeht. Wenn das funktioniert, könnte die Membran in einem Folgeexperiment einen mikroskopisch kleinen Passagier mitnehmen – ein Bärtierchen. Es befände sich dann ebenfalls in einer Superposition (linkes Bild, unten), bis sich das System für einen Schwingungszustand entscheidet (rechtes Bild, unten).



Phänomen ist, wäre dieses außerordentlich schwach ausgeprägt.

Auch in den Daten anderer hochempfindlicher Experimente haben Physiker nach Anzeichen des Kollapses gestöbert. Dazu gehören die Suchkampagnen nach den hypothetischen Teilchen der rätselhaften Dunklen Materie, die einen Großteil der Materie im All ausmachen soll, sich bislang aber jeder direkten Messung entzieht. Detektoren in den spanischen Pyrenäen beispielsweise bestehen aus Germanium und könnten hindurchfliegende Teilchen über das dabei entstehende Röntgenlicht sichtbar machen. Einen ähnlichen Blitz dürfte eine kollabierende Wellenfunktion auslösen. Danach halten Experimentatoren Ausschau – bislang vergeblich.

Solche Befunde schränken den Spielraum für Kollapsmodelle ein, haben ihnen jedoch noch nicht den Todesstoß versetzt. Im September 2017 hat Andrea Vinante, ein Physiker an der University of Southampton in England, gemeinsam mit Bassi und weiteren Kollegen interessante Hinweise gefunden, die das CSL-Modell unterstützen. Sie konstruierten einen Hebelarm mit lediglich einem halben Millimeter Länge und zwei Mikrometer Dicke, kühlten ihn extrem herunter und schotteten ihn sorgfältig von äußeren Einflüssen ab. Bei der erreichten Temperatur von 40 Millikelvin hätte der Hebel, an dessen Ende ein kleiner Magnet befestigt war, kaum noch vibrieren dürfen. Der extrem empfindliche Sensor zeigte allerdings, dass das Bauteil regelrecht auf- und abschwang wie ein Sprungbrett. Die detektierte Auslenkung entsprach dabei dem Ausschlag, der von kollabierenden Wellenfunktionen theoretisch zu erwarten war. Entsprechende Werte hatte der Theoretiker Stephen L. Adler vom Institute for Advanced Study in New Jersey zehn Jahre zuvor berechnet.

Eine erschreckend erfolgreiche Theorie

»Wir haben ein Rauschen festgestellt, das sich nicht erklären ließ«, beschreibt Vinante seine Ergebnisse. »Es passt zu dem, was Kollapsmodelle voraussagen, aber könnte ebenso von Effekten stammen, die wir noch nicht verstehen.« Er arbeitet mit seinen Kollegen daran, die Empfindlichkeit des Versuchs um mindestens einen Faktor 10, vielleicht sogar einen Faktor 100 zu verbessern. »Dann dürften wir entweder sicher sein, dass etwas Anomales vor sich geht, oder ausschließen, dass sich hinter der Beobachtung ein interessanter Effekt verbirgt.« Vinante rechnet mit ein oder zwei Jahren, bis neue Daten vorliegen. Bedenkt man, wie makellos sich die Quantenmechanik in den letzten 100 Jahren geschlagen hat, erscheinen die Chancen auf eine Abweichung von der Standardtheorie gering. Doch was, wenn eines dieser Experimente erfolgreich ist und den Quantenkollaps belegt? Wäre es das Ende der Mysterien und Paradoxien der Quantentheorie?

»Es würde die Welt in zwei verschiedene Skalen einteilen«, vermutet Igor Pikovski, ein theoretischer Physiker am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge. »Jenseits einer gewissen Grenze wäre die Quantenmechanik nicht mehr anwendbar. Aber auf kleineren Ebenen wäre sie noch gültig, und die gleichen philosophi-

schen Fragen würden uns in diesem Bereich weiterhin beschäftigen. Wir hätten eine Viele-Welten-Interpretation für Elektronen und Atome, aber nicht für den Mond. Es würde einige der Probleme nicht lösen, sondern eher komplizierter machen.«

CSL und ähnliche Modelle sind nur mehr erste Ansätze, beide Reiche miteinander zu verbinden. Sie sind noch keine ausgereiften Theorien, aber könnten dabei helfen, eine umfassendere Sicht auf die Realität zu entwickeln. Adler etwa meint dazu: »Ich persönlich glaube, wir werden die Quantenmechanik auf irgendeine Weise modifizieren müssen. Und ich sehe da auch gar kein Problem. 200 Jahre lang hielten alle die newtonsche Mechanik für exakt. Die meisten Theorien funktionieren in einem gewissen Bereich und in einem anderen nicht mehr. Dort brauchen wir dann einen allgemeineren Ansatz.«

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

Bislang besteht die Quantenmechanik jeden Test. »Wir erleben keine Krise. Und genau das ist das Problem!«, sagt Weinberg. »In der Vergangenheit gab es Fortschritte, sobald wir Widersprüchen begegnet sind. Aber bei der Quantenmechanik ist es anders, hier gibt es keine Konflikte zwischen Theorie und Messungen. Die Schwierigkeit liegt eher darin, die reaktionären philosophischen Vorurteile von Menschen wie mir zu befriedigen.«

Trotz all der Seltsamkeiten der Quantenmechanik würden es viele Wissenschaftler gern einfach dabei belassen. Sie benutzen die Theorie für ihre Teilchenbeschleuniger und Dunkle-Materie-Detektoren, und sie halten nur selten inne, um sich Gedanken darüber zu machen, was sie mit der fundamentalen Natur der Realität zu schaffen hat.

»Die meisten Physiker zeigen da eine recht gesunde Einstellung«, resümiert Weinberg, »indem sie die Gleichungen anwenden, um die Grenzen unseres Wissens zu erweitern, während sie die philosophischen Fragen den kommenden Generationen überlassen.« Manche wollen allerdings nicht so lange warten. Bassi mahnt: »Einige Leute erzählen, die Welt sei laut der Quantenmechanik nun einmal seltsam, und wir hätten das zu akzeptieren. Dem widerspreche ich. Wenn etwas seltsam ist, müssen wir es besser verstehen.« ◀

QUELLEN

Norte, R. A. et al.: Mechanical Resonators for Quantum Optomechanics Experiments at Room Temperature. In: Physical Review Letters 116, 147202, 2016

Vinante, A. et al.: Improved Noninterferometric Test of Collapse Models Using Ultracold Cantilevers. In: Physical Review Letters 119, 110401, 2017

QUANTENGRAVITATION EIN STÜCKCHEN SCHWERKRAFT

Alle Wechselwirkungen sind quantisiert. Alle Wechselwirkungen? Eine unbeugsame Kraft hört nicht auf, den Messungen Widerstand zu leisten. Und das Leben ist nicht leicht für die Physiker, die im Labor überprüfen wollen, ob die Regeln der Quantenwelt auch für die Anziehung zwischen zwei Massen gelten ...



Natalie Wolchover ist Physikerin und Wissenschaftsjournalistin in New York. Sie schreibt regelmäßig für das »Quanta Magazine«.

► spektrum.de/artikel/1573432

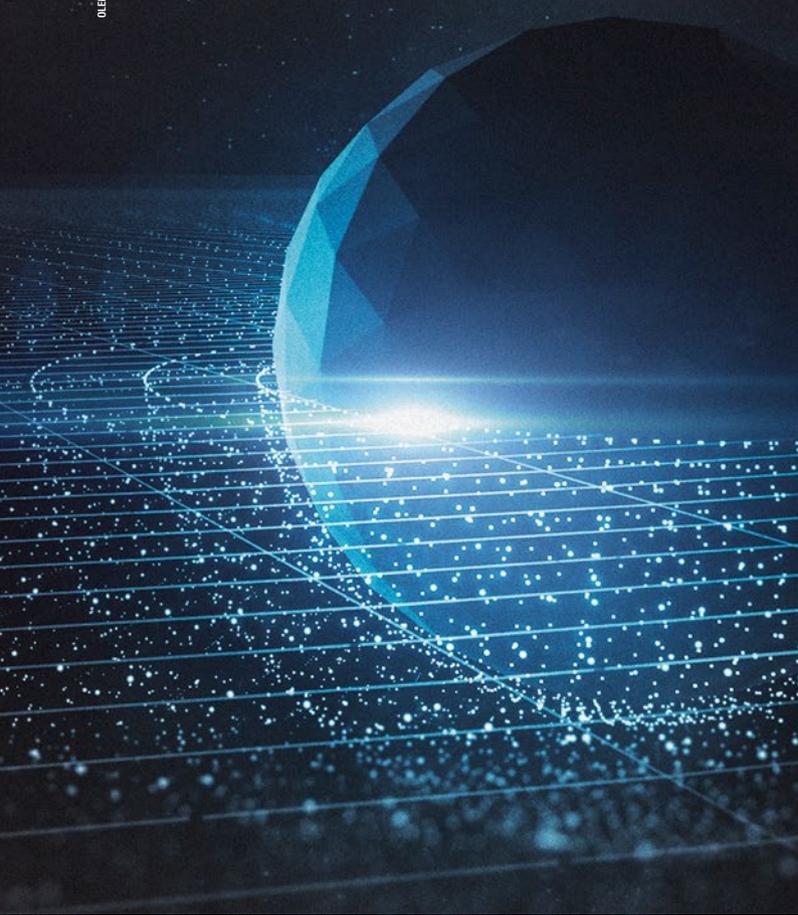
1935 waren sowohl die Quantenmechanik als auch Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie noch jung. In jenem Jahr untersuchte ein heute wenig bekannter sowjetischer Physiker detailliert die Probleme, die beim Versuch auftauchen, beide Theorien zu vereinen. Der damals 28-jährige Matwei Bronstein war auf der Suche nach einer Quantentheorie der Gravitation, der »möglichen Theorie der Welt als Ganzes«. Sie würde Einsteins Beschreibung der Schwerkraft in eben jener Quantensprache neu formulieren, in welcher der ganze Rest der Physik abgefasst ist.

Bronstein fand einen Weg. Er beschrieb die Gravitation mit Hilfe quantisierter Teilchen (heute nennen Physiker solche hypothetischen Objekte Gravitonen). Das gelingt aber nur, wenn die Kraft schwach ist. In der Sprache der allgemeinen Relativitätstheorie heißt das, die Raumzeit ist so wenig gekrümmt, dass sie sich näherungsweise als eben betrachten lässt (die Anwesenheit von Massen verzerrt die vierdimensionale Vereinigung von Raum und Zeit). Bei starker Gravitation sei die Situation ganz anders, schrieb Bronstein: »Es scheint kaum möglich, die Quantentheorie der Gravitation ohne tief greifende Änderungen

der klassischen Sichtweisen in diese Bereiche auszuweiten.« Seine Worte waren prophetisch. Mehr als 80 Jahre später versuchen die Physiker immer noch zu verstehen, wie sich die Krümmung der Raumzeit auf makroskopischen Skalen aus einem grundlegenden Bild der Gravitation ergeben könnte. Dabei handelt es sich vermutlich um die tiefgreifendste Frage der Physik. Der stalinistische Staatsterror nahm Bronstein die Chance, weiter daran zu arbeiten. 1938 wurde das auf vielen Gebieten tätige Genie im Zuge der »Großen Säuberung« verhaftet und hingerichtet.

Nur auf astronomischen Skalen auffällig

Ein Problem bei der Suche nach einer Theorie der Quantengravitation: Die Physiker bekommen die Quanteneigenschaften der Schwerkraft nie zu sehen. Bei den übrigen Naturkräften – der starken, der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung – sind die übermittelnden Teilchen relativ auffällig. Sie halten Atome zusammen und lassen sich mit Experimenten untersuchen. Bei einzelnen Gravitonen hingegen gibt es keinerlei Hoffnung, sie jemals im Labor aufzuspüren. Weil sie so viel schwächer wirken, sind wahrhaft astronomische Ansammlungen von Masse



Die Gravitation verformt die Struktur von Raum und Zeit – aber wie wirkt sie auf mikroskopischer Ebene? Lange schien ein praktischer Test völlig aussichtslos. Nun soll ein Paar winziger Diamanten die Antwort liefern.

nötig, um andere Objekte zu beeinflussen. Deswegen bemerken wir die Schwerkraft immer nur im großen Maßstab.

Im Universum scheint darüber hinaus eine Art kosmischer Zensur zu gelten: Gebiete, in denen die Raumzeit so stark gekrümmt ist, dass Einsteins Gleichungen nicht mehr funktionieren und die wahre Quantennatur der Raumzeit zu Tage treten dürfte, verstecken sich hinter dem undurchdringlichen Ereignishorizont Schwarzer Löcher. »Noch vor wenigen Jahren war es Konsens, dass sich die Quantisierung von Gravitationsfeldern auf keine Art und Weise messen lässt«, kommentiert der theoretische Physiker Igor Pikovski von der Harvard University.

Im Dezember 2017 haben zwei Veröffentlichungen im Fachblatt »Physical Review Letters« die Lage geändert. Die Autoren behaupten, Quanteneffekte der Gravitation seien nachweisbar. Eine der Arbeiten stammt von Sougato Bose vom University College London und neun Kollegen, die andere mit einem ähnlichen Grundgedanken von Chiara Marletto und Vlatko Vedral von der University of Oxford. Die Forscher schlagen technisch anspruchsvolle, aber prinzipiell durchführbare Laborexperimente vor, mit denen

AUF EINEN BLICK EINBLICKE IN DIE QUANTEN-RAUMZEIT

- 1** Seit fast einem Jahrhundert versuchen Theoretiker zu verstehen, wie sich die Krümmung der Raumzeit aus einem grundlegenden, mutmaßlich quantenmechanischen Bild der Gravitation ergeben könnte.
- 2** Die Schwerkraft ist im Vergleich zu den anderen Naturkräften extrem schwach. Deswegen lässt sich die Wirkung eines einzelnen ihrer hypothetischen Übertragerteilchen nicht direkt messen.
- 3** Jetzt haben Physiker Experimente erdacht, die zumindest auf indirekte Weise zeigen würden, ob die Gravitation den Gesetzen der Quantenmechanik gehorcht.

sich überprüfen ließe, ob die Schwerkraft ebenso quantisiert ist wie alle anderen Wechselwirkungen. Dabei würden allerdings keine Gravitonen direkt aufgespürt werden.

Boses Gruppe setzt auf ein Paar von Mikrodiamanten und will mit ihnen bestimmen, ob sich zwei Objekte über ihre gegenseitige gravitative Anziehung »verschränken«. Verschränkung ist ein charakteristisches Quantenphänomen, das Teilchen miteinander verbindet. Sie lassen sich dann nur noch gemeinsam physikalisch beschreiben. Dazu kommt ein weiteres Markenzeichen von Quantensystemen, die Überlagerung mehrerer möglicher Zustände. Beispielsweise könnte ein verschränktes System zweier Teilchen in einer solchen »Superposition« existieren, bei

welcher einerseits der quantenmechanische Drehimpuls («Spin») eines Teilchens A aufwärts gerichtet ist und jener eines Teilchens B abwärts; andererseits könnte es genau umgekehrt sein. Es ist dann nicht möglich vorherzusagen, wie das Ergebnis einer Messung der Spins ausgeht. Sicher ist nur, dass sie in die entgegengesetzten Richtungen zeigen.

Die Autoren behaupten nun, die beiden Objekte in ihrem Experiment könne man nur miteinander verschränken, wenn die zwischen ihnen wirkende Kraft – die Gravitation – eine Quantenwechselwirkung ist. Das ist keineswegs klar: Weil die Quantengravitation so unmerklich ist, haben manche Forscher bereits in Frage gestellt, ob sie überhaupt existiert. Der mathematische Physiker Freeman Dyson behauptet seit 2001, das Universum ließe sich möglicherweise nur dualistisch beschreiben: »Das Gravitationsfeld der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins ist ein rein klassisches Feld ohne jedes Quantenverhalten«, schrieb er in jenem Jahr. Und das gelte, obwohl im glatten Raumzeitkontinuum alle Materie in Teilchen quantisiert ist und den Regeln der Wahrscheinlichkeit folgt.

Der heute über 90-jährige Dyson war als Professor am Institute for Advanced Study in Princeton eine Zeit lang gleichzeitig mit Einstein tätig und unter anderem an der Entwicklung der Quantenelektrodynamik beteiligt, der Theorie der Wechselwirkungen zwischen Materie und Licht. Der Forscher widerspricht der These, für die Beschreibung Schwarzer Löcher sei eine Quantentheorie der Gravitation nötig. Und er fragt sich, ob nicht ein Nachweis des hypothetischen Gravitons prinzipiell unmöglich sein könnte. In diesem Fall wäre die Quantengravitation als Metaphysik einzuordnen und nicht als Physik.

Der Streit der Theoretiker wird im Labor entschieden

Dyson ist nicht der einzige Skeptiker. Der renommierte britische Physiker Sir Roger Penrose sowie der ungarische Forscher Lajos Diósi haben unabhängig voneinander die Hypothese aufgestellt, die Raumzeit könne keine Superposition zeigen. Die beiden Forscher argumentieren, die glatte, feste und fundamental klassische Natur der Raumzeit verhindere, dass sie auf zwei unterschiedliche Arten zugleich gekrümmt sein könne. Die Rigidität der Raumzeit sei zugleich der Grund für den Kollaps der Superpositionen von Quantensystemen. Diese »gravitative Dekohärenz« führt ihrer Ansicht nach zu der klassischen Realität, die wir makroskopisch wahrnehmen. Ein Nachweis der Quantengravitation würde diese Argumente widerlegen und zeigen, dass Gravitation und Raumzeit eben doch Superpositionen aufweisen.

Die beiden Vorschläge für einen experimentellen Test erschienen zufällig zur gleichen Zeit, reflektieren aber einen aktuellen Trend. Denn in Quantenlaboren überall auf der Welt versetzen Forscher immer größere Objekte in Überlagerungszustände und entwickeln Verfahren für den Nachweis einer Verschränkung zwischen zwei Quantensystemen (siehe »An der Grenze zur Quantenwelt«, S.12). Die vorgeschlagenen Experimente kombinieren diese Prozeduren. Allerdings erfordern sie noch einmal deutlich empfindlichere Mess- und Manipulationstechniken. Es



Ein winziger Mikrodiamant (Pfeil) schwebt vor einer ungleich größeren Linse, die ihn mit Hilfe von Licht gefangen hält.

könnte darum ein Jahrzehnt oder länger bis zur erfolgreichen Durchführung dauern. »Aber es gibt keine physikalischen Hindernisse«, kommentiert Pikovski, der ebenfalls untersucht, wie sich mit Laborexperimenten Gravitationsphänomene erforschen lassen. Er bekräftigt: »Es ist eine Herausforderung, aber nicht unmöglich.«

Boses Veröffentlichung enthält einen detaillierten Plan für die Umsetzung der Idee, inklusive einer Liste der Experten für die einzelnen Schritte. An der University of Warwick arbeitet beispielsweise Koautor Gavin Morley am ersten Teilstück. Er will einen Mikrodiamanten so in Superposition bringen, dass dieser sich an zwei Orten gleichzeitig aufhält. Um das zu erreichen, bettet er ein Stickstoffatom in Nachbarschaft zu einer Fehlstelle in das Gitter des Diamantkristalls ein. Dabei entsteht eine spezielle elektronische Struktur, die einen von außen eingestrahlt Mikrowellenpuls mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit absorbiert. So gerät das System in eine Superposition zweier Spinrichtungen – aufwärts und abwärts. Der mit der Spin-Superposition bepackte Mikrodiamant wird jetzt einem magnetischen Feld ausgesetzt. In diesem bewegt sich ein aufwärts gerichteter Spin nach links, ein abwärts gerichteter nach rechts. So spaltet sich die Bewegung des Mikrodiamanten in eine Superposition zweier möglicher Pfade auf (siehe »Quantendiamanten«, rechte Seite).

Im Experiment müssen die Forscher diesen Vorgang mit zwei Diamanten nebeneinander durchführen – nennen wir sie blau und rot –, die extrem gekühlt und in einem Vakuum in der Schwebe gehalten werden. Sobald sie losgelassen werden, fallen die beiden Mikrodiamanten jeweils in Superposition zweier Pfade vertikal durch das Vakuum. Während sie fallen, ziehen sie sich gegenseitig gravitativ an. Doch wie stark ist diese Kraft? Wenn die Schwerkraft eine Quantenwechselwirkung ist, lautet die Antwort: Es kommt darauf an. Die Gravitation hängt vom Abstand zwischen den Diamanten ab. Jede Komponente der Super-

position des blauen Diamanten erfährt also eine stärkere oder schwächere Anziehungskraft durch den roten Diamanten, je nachdem, in welchem Zweig seiner Superposition dieser sich befindet. Gleiches gilt umgekehrt für die Überlagerungszustände des roten Diamanten.

In jedem Fall beeinflusst die Stärke der Gravitation, wie sich die Superpositionen der Mikrodiamanten im Lauf der Zeit entwickeln. Die Zustände der beiden Diamanten mitsamt ihrer Spins sind darum voneinander abhängig und lassen sich nur noch gemeinsam beschreiben.

Nachdem die Mikrodiamanten drei Sekunden lang Seite an Seite gefallen sind – ausreichend Zeit, um durch die Gravitation miteinander verschränkt zu werden – durchqueren sie ein Magnetfeld, das die Zweige der Superpositionen wieder zusammenführt. Der letzte Schritt ist ein von Barbara Terhal in den Niederlanden entwickeltes »Verschränkungs-Zeugenprotokoll«: Der blaue und der rote Diamant treffen auf Detektoren für die Spinrichtung des Systems. Erst diese Messung lässt die Superposition in eindeutige Zustände kollabieren.

Das Experiment wird nun wieder und wieder durchgeführt. Indem sie eine große Anzahl von Ergebnissen vergleichen, können die Forscher herausfinden, ob die Spins der beiden Quantensysteme stärker miteinander korreliert sind, als es für klassische, nicht verschränkte Objekte erlaubt wäre. »Das Schöne daran ist, dass man gar nicht wissen muss, wie die Quantentheorie der Gravitation tatsächlich aussieht«, erläutert Miles Blencowe, Physiker am Dartmouth College. »Es geht nur darum, ob das Feld, das die Kraft zwischen den Teilchen vermittelt, irgendeine Art von Quantencharakter besitzt.«

Wie überlagert man Milliarden Atome?

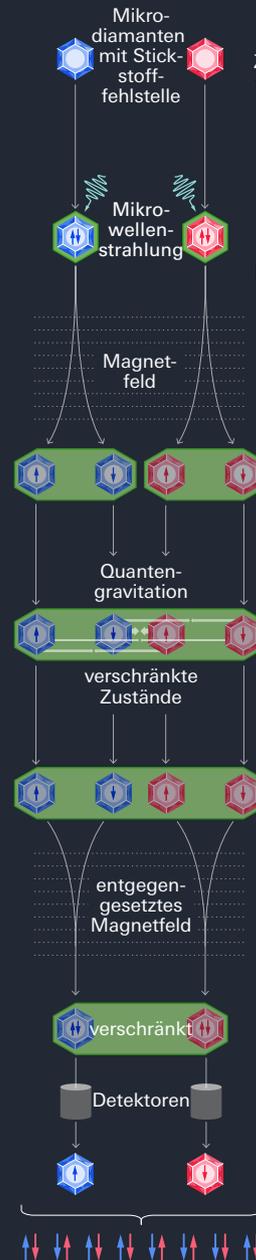
Es gibt jedoch eine Fülle technischer Herausforderungen. Während bislang beispielsweise Moleküle aus höchstens 800 Atomen in eine Superposition zweier Orte gebracht worden sind, enthält jeder Mikrodiamant 100 Milliarden Kohlenstoffatome – die Menge reicht gerade eben für eine messbare Anziehungskraft aus. Deren quantenmechanischen Charakter herauszukitzeln, erfordert tiefere Temperaturen, ein reineres Vakuum und genauere Kontrollen als bislang möglich. »Ein großer Teil der Arbeit besteht darin, die Superposition zu erzeugen und zu erhalten«, sagt Peter Barker, ein Mitglied des Experimentaltteams am University College London. Er arbeitet an Verbesserungen der Laserkühlung und der Falle für die Mikrodiamanten. Wenn es erst einmal mit einem Diamanten funktioniert, ergänzt Bose, »dann wäre es kein großer Unterschied mehr, es auch für zwei hinzubekommen.«

Die meisten Experten zweifeln nicht daran, dass auch die Gravitation eine Quanten-Wechselwirkung und damit in der Lage ist, Verschränkung hervorzurufen. Zwar gibt es noch so einiges, was die Forscher über den Ursprung von Raum und Zeit herausfinden müssen. Dennoch sollte die Quantenmechanik irgendwie beteiligt sein. »Der Versuch einer Theorie, in der die Gravitation klassisch und der Rest der Physik quantenmechanisch ist, erscheint mir wenig zielführend«, sagt Daniel Harlow, ein Quantengravitations-Forscher am Massachusetts Institute of Technology.

Quantendiamanten

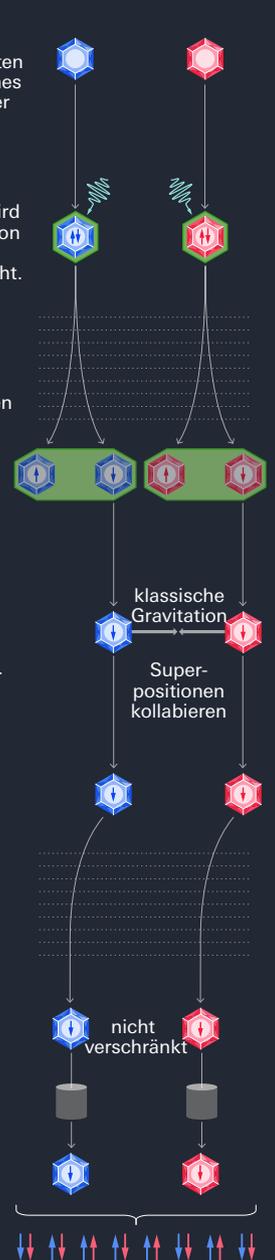
Ein neu konzipiertes Experiment bringt zwei Mikrodiamanten in eine quantenmechanische Überlagerung je zweier möglicher räumlicher Positionen. Wenn die Schwerkraft quantisiert ist, dann müsste die gegenseitige gravitative Anziehung die Zustände der beiden Diamanten verschränken.

Quantengravitation



Wäre die Gravitation quantisiert, müssten Paare von Messungen häufiger korreliert sein, als es der Zufall erlaubt.

Klassische Gravitation



Wenn die Gravitation eine klassische Wechselwirkung ist, dann sind Paare von Messungen unkorreliert und zufällig.

LUCY FREDRICKS-KANDA / QUANTA MAGAZINE (IT-BEREBITUNG, SPECTRUM DER WISSENSCHAFT)

Andererseits hätten sich Theoretiker schon früher geirrt, merkt er an. »Wenn man es also ein für alle Mal überprüfen könnte, warum sollte man das nicht machen?«, fragt er und setzt mit Blick auf jene Kollegen, die den Quantencharakter der Gravitation anzweifeln, hinzu: »Das brächte diese Leute zum Schweigen.«

Nachdem er die Veröffentlichungen in den »Physical Review Letters« gelesen hatte, kommentierte Dyson: »Das vorgeschlagene Experiment ist sicherlich von großem Interesse und wert, durchgeführt zu werden.« Allerdings wiche die Sicht der Autoren von seiner eigenen ab: »Mir ist nicht klar, ob der Versuch wirklich die Frage nach der Existenz einer Quantengravitation beantworten würde. Das Problem, das mich beschäftigt – ob ein einzelnes Graviton beobachtbar ist – unterscheidet sich davon und könnte eine andere Lösung haben.«

Tatsächlich leitete sich die Art und Weise, in der Bose, Marletto und ihre Mitarbeiter die Quantengravitation betrachten, direkt davon ab, wie Bronstein sie 1935 zuerst postulierte. Insbesondere zeigte er, dass die schwache Gravitation einer kleinen Masse sich näherungsweise mit dem newtonschen Gravitationsgesetz beschreiben lässt. Das gilt demnach ebenso für die Massenanziehung der beiden Mikrodiamanten in ihren Superpositionen. Die Theorie schwacher Quantengravitationsfelder ist bislang jedoch nicht weit entwickelt, betont Blencowe. Und das, obwohl sie praktisch vermutlich relevanter sei als die Physik Schwarzer Löcher oder des Urknalls. Er hofft, das vorgeschlagene Experiment sporne die Theoretiker an, nach kleinen Abweichungen von der newtonschen Näherung zu suchen, die sich vielleicht künftig nachweisen lassen.

Eigenarten der Gravitation passen nicht zu den üblichen Herangehensweisen

Leonard Susskind, ein bekannter Stringtheoretiker an der Stanford University, hält das vorgeschlagene Experiment für wertvoll, weil es »Beobachtungen der Gravitation in einem bislang unerforschten Bereich von Massen und Abständen liefert«. Doch er mahnt an, die Mikrodiamanten würden nichts über die vollständige Theorie der Quantengravitation verraten. Denn Susskind und seinen Kollegen geht es eben gerade um die Vorgänge im Zentrum eines Schwarzen Lochs und im Moment des Urknalls.

Vielleicht ist einer der Gründe für die Schwierigkeiten bei der Quantisierung der Gravitation eine als Lokalität bezeichnete Eigenschaft der übrigen Wechselwirkungen. Das erklärt Mark Van Raamsdonk, ein Theoretiker an der University of British Columbia: Bei Letzteren seien die Quantenteilchen, beispielsweise Photonen im elektromagnetischen Feld, »unabhängig von den physikalischen Elementen in anderen Regionen des Raums«. Doch es gebe zumindest eine Reihe theoretischer Hinweise, dass das nicht für die Gravitation gilt.

In den bislang führenden Modellen der Quantengravitation sind die Geometrien der Raumzeit einfacher als im realen Universum. Dabei ließe sich die Raumzeit nicht in unabhängige dreidimensionale Stücke unterteilen, sagt Van Raamsdonk. Stattdessen deute die moderne Theorie

auf »eher zweidimensional organisierte« grundlegende Elemente des Raums hin. Die Raumzeit könne einem Hologramm oder einem Videospiel ähneln: »Obwohl das Bild dreidimensional ist, werden die Informationen zweidimensional gespeichert.« Dann wäre die Welt eine Illusion in dem Sinn, dass verschiedene Teile nicht voneinander unabhängig sind. In der Analogie des Videospiele kodieren ein paar Bits auf einem zweidimensionalen Chip globale Eigenschaften des virtuellen Universums.

Dieser Unterschied ist von Bedeutung, wenn man versucht, eine Quantentheorie der Gravitation zu konstruieren. Die übliche Herangehensweise bei der Quantisierung ist, unabhängige Teile zu identifizieren – beispielsweise Elementarteilchen – und auf diese die Regeln der Quantenmechanik anzuwenden. Doch wenn man nicht die richtigen Bestandteile herauspicks, erhält man falsche Gleichungen. Den dreidimensionalen Raum direkt zu quantisieren, wie Bronstein es getan hat, funktioniert bis zu einem gewissen Grad bei schwachen Gravitationsfeldern. Doch die Methode versagt, wenn die Raumzeit stark gekrümmt ist.

Eine Beobachtung der Auswirkungen von Quantengravitation könnte der bislang abstrakten Argumentation Realitätsbezug verleihen, meinen manche Experten. Denn schließlich fehle selbst den gewichtigsten theoretischen Gründen die Überzeugungskraft experimenteller Fakten. Van Raamsdonk gesteht ein: Wenn er etwa bei Kolloquien oder alltäglichen Unterhaltungen seine Forschung erläutern will, fällt es ihm schwer, nachvollziehbar zu motivieren, warum die Gravitation überhaupt in Einklang mit der Quantentheorie gebracht werden muss. Weil die klassische Beschreibung bei Schwarzen Löchern und dem Urknall versagt? Weil Gedankenexperimente über Teilchenkollisionen bei unerreichbar hohen Energien es erfordern? »Wenn wir diesen einfachen Versuch durchführen könnten und die Ergebnisse beweisen würden, dass das Gravitationsfeld in einer Superposition vorgelegen hat«, bilanziert er, dann wäre das Versagen der klassischen Beschreibung offensichtlich und seine Antwort könnte einfach lauten: »Ein Experiment hat uns gezeigt, dass die Schwerkraft quantisiert sein muss.« ◀

QUELLEN

Bose, S. et al.: Spin Entanglement Witness for Quantum Gravity. In: Physical Review Letters 119, 240401, 2017

Marletto, C., Vedral, V.: Gravitationally Induced Entanglement between Two Massive Particles is Sufficient Evidence of Quantum Effects in Gravity. In: Physical Review Letters 119, 240402, 2017

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Physicists Find a Way to See the »Grin« of Quantum Gravity« 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.



Kann unser Verstand sich selbst verstehen?



P.M. Neugierig auf morgen.

ASTROPHYSIK WOHER STAMMT DIE ANTIMATERIE?

Aus dem All erreichen uns unerwartet viele Positronen. Stammen sie von Pulsaren oder Dunkler Materie? Neue Messungen sprechen für Letzteres.

► Unablässig prasseln Partikel aus dem Weltall auf die Erde, zumeist Protonen. Ab und zu findet sich darunter neben anderen Teilchen aber auch ein Positron – das Antiteilchen des Elektrons. Es entsteht, wenn ein Proton mit einem Atomkern im interstellaren Raum zusammenprallt. Als Forscher allerdings das tatsächliche Vorkommen dieser Positronen näher untersuchten, fanden sie deutlich mehr davon, als sie erwartet hatten.

Der unerwartete Überschuss deutete sich bereits bei Experimenten mit Ballons Mitte der 1990er Jahre an. Diese waren mit Spektrometern bestückt und detektierten die Antiteilchen in den oberen Atmosphärenschichten. Offenkundig wurde die Sache, als italienische Forscher 2008 die Daten des Detektors PAMELA auswerteten, der auf einem russischen Satelliten in unserem Orbit reiste. Schließlich bestätigte das seit 2011 auf der Internationalen Raumstation installierte Alpha-Magnet-Spektrometer (AMS), der größte je im All stationierte Teilchendetektor, das überraschende Resultat endgültig: Es fand sogar mehr hochenergetische Positronen als solche mit niedriger Energie. Das wäre völlig unerklärlich, wenn diese nur durch Kollisionen von Protonen mit anderen Kernen entstehen würden.

Antimaterie ist im Universum sehr selten: Alle Relikte vom Urknall sind schon lange verschwunden, da sie über

die Zeit mit gewöhnlicher Materie zusammengestoßen sind, wobei sich beide gegenseitig vernichtet haben. Deshalb stammen auf der Erde gemessene Antiteilchen aus unserer näheren kosmischen Umgebung.

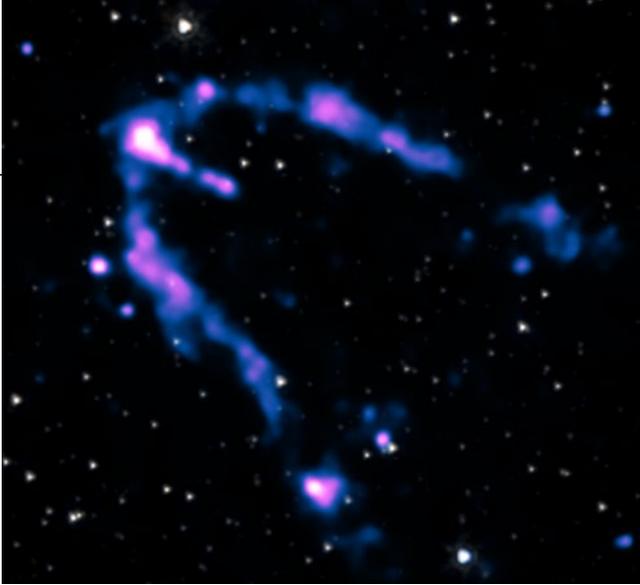
Insbesondere haben Astrophysiker dabei bestimmte Neutronensterne im Verdacht: Solche Pulsare sind extrem kompakte Sternleichen, die sich mit teils aberwitziger Geschwindigkeit um ihre eigene Achse drehen. Sie erzeugen dadurch außergewöhnlich starke Magnetfelder von mehr als 100 Millionen Tesla – über eine Million mal stärker als jeder bislang auf der Erde hergestellte Magnet. Wegen dieser Felder wirken Pulsare wie ein Teilchenbeschleuniger; sie sammeln um sich herum geladene Materie in einem Nebel. Die darin befindlichen Partikel stoßen immer wieder zusammen, ähnlich wie im größten irdischen Teilchenbeschleuniger LHC, und erzeugen unter anderem Positronen, von denen einige schließlich ihren Weg bis zur Erde finden.

Eine internationale Kollaboration von Physikern unter Beteiligung des Max-Planck-Instituts für Kernphysik (MPIK) in Heidelberg hat nun jedoch zwei prominente Kandidaten vom Verdacht freigesprochen, die Quelle der überzähligen Positronen zu sein: die beiden Pulsare Geminga und PSR B0656+14. Beide sind Überreste von Riesensternen, die

Die komplizierte Struktur von Geminga (hier in einer Illustration) erklären sich Astronomen mit zwei gegenläufigen Materiestrahlen, die der Pulsar entlang seiner Rotationspole aussendet.*



HINTER: NASAC/COPPER PERSEUS ET AL.; VORHINTER: NASA/COPPER PERSEUS ET AL.; ILLUSTRATION: DANIEL TREIBER



Kompositbild des Geminga-Pulsars, erstellt mit Röntgendaten des Chandra-Satelliten und Infrarotdaten des Spitzer-Satelliten.

einst als Supernova explodierten. Sie liegen in Richtung des Sternbilds Zwillinge und sind etwa 800 Lichtjahre von der Erde entfernt.

Die Forscher konnten zwar bestätigen, dass energiereiche Positronen aus ihrer Umgebung kommen, »aber unsere Analyse ihrer Ausbreitung zeigt auch klar, dass sie keinen wesentlichen Beitrag zum beobachteten Positronenüberschuss leisten können«, erklärt Koautor Rubén López-Coto vom Heidelberger MPIK. Die Positronen bewegen sich zu langsam, um innerhalb der 300 000 Jahre, die seit der Entstehung der Pulsare und ihrer umgebenden Nebel vergangen sind, in ausreichender Zahl zur Erde gelangt zu sein.

Steckt nun doch die Dunkle Materie dahinter?

Damit geht die Suche nach den rätselhaften Quellen der überschüssigen Positronen weiter. Leider lassen sich die Teilchen selbst nicht einfach zum Ursprungsort ihrer Reise zurückverfolgen. Weil sie elektrisch geladen sind, zwingen die Magnetfelder unserer Galaxie sie auf komplizierte, verworrene Bahnen, so dass die Wissenschaftler aus ihrer hiesigen Ausbreitungsrichtung nicht auf ihren Entstehungsort rückschließen können.

Statt der Positronen selbst untersuchten López-Coto und seine Kollegen deshalb hochenergetische Gammastrahlung, die aus dem Umfeld der beiden Pulsare stammt. Gammaquanten bewegen sich nämlich wie Licht geradlinig vom Ursprungsort zum Beobachter, wenn man die in diesen Fällen vernachlässigbaren Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie außer Acht lässt. Die stark beschleunigten Positronen in der Umgebung von Pulsaren erzeugen die Gammastrahlen, wenn sie mit Lichtquanten der kosmischen Hintergrundstrahlung zusammenstoßen und diesen Photonen einen Teil ihrer Energie übertragen.

Verantwortliche Pulsare müssten aus der Nachbarschaft stammen. Das bedeutet allerdings, dass die Positronen speienden Objekte höchstens wenige tausend Lichtjahre von uns entfernt liegen können, da die Antiteilchen

auch nach Verlassen des Pulsarnebel mit anderen Partikeln im interstellaren Raum kollidieren und dadurch weiter Energie verlieren. Ihre Reichweite ist daher eingeschränkt. Als Quelle für die überschüssigen Positronen taugen ausschließlich Pulsare, die astronomisch gesehen in der näheren Umgebung unserer Milchstraße liegen. Genau deshalb galten Geminga und PSR B0656+14 als geeignete Kandidaten – sowohl ihre Entfernung als auch ihr Alter erschien passend.

Die Untersuchung beider Sternleichen gestaltete sich nicht einfach. Ihre Umgebung leuchtet nämlich über mehrere Grad am Himmel hell im Gammalicht. Spezielle Teleskope wie HESS in Namibia oder MAGIC auf La Palma haben ein zu beschränktes Gesichtsfeld, um derart ausgedehnte Objekte zu beobachten. Das HAWC (High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray)-Observatorium in Mexiko ist jedoch auf solche Weitwinkelbeobachtungen spezialisiert. Es steht in 4100 Meter Höhe auf einer Flanke des Vulkans Sierra Negra und sieht auf den ersten Blick wie ein Treibstofflager aus: Es besteht aus 300 dicht beieinander stehenden Tanks mit hochreinem Wasser, von je 7,3 Meter Durchmesser und 4,5 Meter Höhe.

Trifft ein Gammaquant auf unsere Atmosphäre, zerschlägt es dort Atome, und es entstehen Kaskaden von Elementarteilchen. Einige dieser Partikel gelangen bis zur Erdoberfläche und erzeugen blaue Blitze – Tscherenkov-Strahlung – in den Wassertanks, die sensible Lichtsensoren registrieren. Aus der Strahlungsrichtung und weiteren Reaktionen leiten Forscher die Energie und den Entstehungsort des ursprünglichen Gammaquants ab. Indem die Physiker diese Orte in einer Himmelskarte eintragen, erhalten sie ein Bild der hochenergetischen Photonenquellen – in diesem Fall von Geminga und PSR B0656+14. Die ermittelte Energie der Positronen reicht allerdings nicht aus, um die vielen Antiteilchen auf der Erde zu erklären.

Das heißt jedoch nicht, dass damit Pulsare generell als Verursacher ausgeschlossen werden könnten, meint López-Coto. Es könnte in der kritischen Distanz von weniger als 1000 Lichtjahren noch unentdeckte Pulsare geben. »Zudem kann die Ausbreitung der kosmischen Strahlung in andere Richtungen anders verlaufen als aus Richtung von Geminga«, sagt der Wissenschaftler.

Die Forscher werden daher mit HAWC weiter nach Sternleichen im Gammalicht suchen. Falls sie keine finden, bleibt höchstwahrscheinlich nur noch eine Erklärung für die überschüssigen Positronen übrig: die Dunkle Materie.

Die überwältigende Mehrheit der Physiker geht davon aus, dass sich Galaxien und Sterne wegen der Masse von Dunkler Materie so bewegen, wie Astronomen es beobachten. Das ansonsten unsichtbare Material sollte demnach allgegenwärtig sein – doch aus welchen Teilchen es besteht, weiß bislang niemand. Viele Forscher sehen in den so genannten WIMPs gute Kandidaten für die Dunkle Materie – und damit auch für die Positronenquelle im All. Denn sie könnten beim Zerfallen oder gegenseitigen Zerstrahlen hochenergetische gewöhnliche Materie und Antimaterie produzieren, darunter Positronen.

Leider hat diese elegante Theorie einen gravierenden Schönheitsfehler: Trotz großem Aufwand gelang es Wissenschaftlern bislang nicht, Dunkle Materie im Labor zweifelsfrei nachzuweisen. Auch der Teilchenbeschleuniger LHC des CERN hat bislang keinerlei Hinweise auf WIMPs zu Tage gefördert. Eventuell könnten die überschüssigen Positronen den entscheidenden Beitrag zur Entschlüsselung des Rätsels um die Dunkle Materie liefern. Wenn nämlich WIMPs für die unerwartet hohe Anzahl von Antiteilchen verantwortlich sind, produzieren sie nur Positronen bis zu einer bestimmten Energie – und zwar der Energie, die der Masse der WIMPs entspricht. Das Positronenspektrum sollte also bei einem bestimmten Punkt steil abfallen. Die genauen Messungen, die der AMS-Detektor laufend verfeinert, zeigen bei einer Energie

von ungefähr 350 Milliarden Elektronenvolt tatsächlich einen solchen Rückgang.

Allerdings haben die Wissenschaftler bisher noch nicht genügend hochenergetische Positronen registrieren können, um eine belastbare Aussage zu liefern. Bis auf Weiteres passen die AMS-Daten ebenso zu den hypothetischen WIMPs wie zu Pulsaren – oder einer Kombination aus beidem. ◀

Jan Hattenbach ist Astronom und Wissenschaftsjournalist auf La Palma.

QUELLE

Abeysekara, A.U. et al.: Extended Gamma-Ray Sources Around Pulsars Constrain the Energy of the Positron Flux at Earth. In: *Science* 358, S. 911–914, 2017

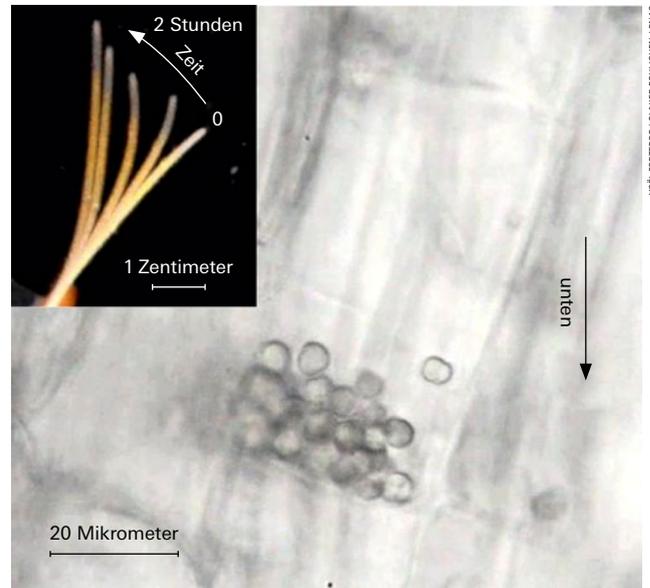
PFLANZENPHYSIOLOGIE GRÜNE WASSERWAAGE

Dank ihrer Fähigkeit, die Schwerkraft wahrzunehmen, wachsen Pflanzen exakt senkrecht nach oben. Aber warum funktioniert das so präzise?

Würden Pflanzen einfach immer im rechten Winkel aus der Erde sprießen, bekämen sie an Abhängen ein Problem. Weil der Boden dort geneigt ist, wüchse der Spross schräg nach oben. Je länger und schwerer er würde, umso mehr stiege die Gefahr, dass er unter seinem eigenen Gewicht umknickt.

Die Evolution hat einen Mechanismus hervorgebracht, der das verhindert. Der so genannte Gravitropismus ermöglicht es Pflanzen, stets eine aufrechte Haltung einzunehmen, selbst auf schieferm Untergrund. Die Gewächse registrieren, in welcher Richtung der Erdmittelpunkt liegt, und steuern ihr Wachstum entsprechend. Infolgedessen sprießen die Pflanzenorgane entweder senkrecht nach unten (»positiv gravitrop«, etwa bei Hauptwurzeln), senkrecht nach oben (»negativ gravitrop«, wie bei Sprossachsen) oder auch horizontal zur Seite wie bei Seitenwurzeln.

Doch woher »weiß« die Pflanze, wo oben und unten ist? Hierbei helfen ihr spezialisierte Zellen, die in den Spitzen der Wurzeln und Sprossen sowie in den Streckungszonen der Sprossachsen sitzen. Diese »Statozyten« enthalten mikroskopisch kleine Körnchen namens Statolithen, die hauptsächlich aus Stärke bestehen. Auf Grund ihres Gewichts sinken die Statolithen im Zellplasma nach unten und sammeln sich an der tiefsten Stelle. Die Pflanze registriert das über noch unbekannte Rezeptoren. Mit Hilfe dieser Information regelt sie die Verteilung von Wachstumsfaktoren, so genannten Phytohormonen, im Pflanzengewebe. Tritt eine Abweichung von der senkrechten Achse auf, lassen die Phytohormone das jeweilige Pflanzenorgan auf einer Seite schneller wachsen als auf der anderen, wodurch es sich wieder zur Vertikalen hin krümmt.



YOËL FORTERRE / OLIVIER POULOUËN / PHAS

Spezialisierte Pflanzenzellen namens Statozyten enthalten Körnchen, die im Zellplasma absinken und sich am Boden sammeln (großes Bild). Das zeigt der Pflanze, wo unten ist (Pfeil), und erlaubt etwa Weizenkeimlingen, sich in kurzer Zeit aus schiefer Haltung aufzurichten (kleines Bild).

Viele Forscher wundern sich darüber, wie sensibel dieser Mechanismus ist. »Oberirdische Pflanzenorgane reagieren selbst auf die schwächste Verkippung«, betonen Forscher um Yoël Forterre vom Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (Marseille), »es gibt keinerlei Schwellenwert des Neigungswinkels.« Ihrer Ansicht nach wäre diese hohe Empfindlichkeit kaum erklärbar, wenn sich die Statolithen schlicht wie suspendierte Partikel verhalten würden – etwa wie Sand in Wasser. Denn dann würden die Körnchen aneinanderreiben und sich, wenn sie in der Zelle aufeinanderliegen, gegenseitig festklemmen. Auf diese Weise stabilisiert, könnten sie auf kleine Kippwinkel nicht reagieren. Erst bei großen

Neigungswinkeln würden sie hinreichend stark hangabwärts drängen, um ins Rutschen zu kommen und so ihre Position in der Zelle zu verändern.

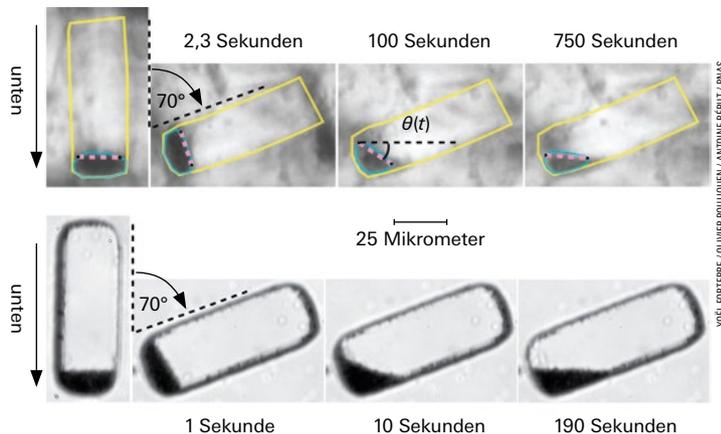
Forterre und sein Team sind dieser Frage nachgegangen und experimentierten mit schwerkraftwahrnehmenden Zellen aus den Spitzen von Weizenkeimlingen. Anhand von Mikroskopaufnahmen stellen sie fest, dass ein solcher Statozyt typischerweise einige dutzend Statolithen enthält, die jeweils etwa 4,5 Mikrometer (millionstel Meter) Durchmesser haben. Im Ruhezustand sinken die Statolithen auf den Boden der Zelle und bilden einen Haufen.

Sobald die Zellen aus der Senkrechte gekippt werden, kommen die Körnchen ins Rutschen und bewegen sich zum nunmehr tiefsten Punkt der Zelle, wie die Forscher schreiben. Mit einer Bildverarbeitungssoftware werteten sie die Mikroskopaufnahmen aus und stellten fest, dass sich die Oberfläche des Statolithenhaufens am Ende stets waagrecht ausrichtet – vergleichbar einer Flüssigkeit, deren Spiegel immer die Horizontale anstrebt. Das ist für körnige Materialien eher untypisch, denn diese schichten sich normalerweise zu einem Haufen mit geneigter Oberfläche, so wie der Sand in einer Sanduhr. Stark vergrößerte Videoaufnahmen zeigten, dass die Statolithen nicht einfach passiv in der Zelle herumliegen, sondern immer wieder emporgehoben werden. Dadurch bleiben sie in ständiger Bewegung – wie Kiesel in einem Karton, den man unablässig schüttelt. Dieser Mechanismus stelle sicher, dass sich das Statolithenensemble einer Flüssigkeit ähnlich verhalte, daher auch auf sehr kleine Neigungswinkel reagiere und die Pflanze somit empfindlicher für Verkipungen mache, vermuten die Forscher.

In ständiger Unruhe

Um ein solches Verhalten nachzustellen, experimentierten Forterre und seine Kollegen mit wassergefüllten Gefäßen, die in etwa die Größe von Statozyten besaßen. Dort hinein gaben die Forscher künstlich hergestellte Partikel aus Siliziumdioxid mit 2 bis 4,4 Mikrometer Durchmesser – als Analogon zu den Statolithen. Die Partikel unterliegen der brownischen Bewegung und bilden daher am Boden der Gefäße Ansammlungen, die stets in einer gewissen Unruhe begriffen sind. Auch die künstlichen Körnchen hätten kollektiv ein flüssigkeitsähnliches Verhalten an den Tag gelegt, berichten die Wissenschaftler. Allerdings zeige der Vergleich zwischen den Siliziumdioxidpartikeln und den Statolithen, dass Letztere in der Pflanzenzelle wesentlich stärkere Bewegungen vollführen, als allein mit der brownischen Bewegung erklärbar ist. Es müsse daher einen intrazellulären Mechanismus geben, der die Statolithen immer wieder nach oben befördere. Vermutlich habe er mit dem Zytoskelett zu tun, genauer mit dem intrazellulären Aktin-Myosin-Netzwerk. Darauf deuteten auch frühere Experimente hin, in denen die Funktion des Aktins gehemmt wurde – worauf sich die Statolithen weniger stark bewegten.

Nicht bei allen Wissenschaftlern stößt die Arbeit von Forterre und seinem Team auf Zustimmung. »Ich sehe



Sowohl Statolithen in einer Pflanzenzelle (obere Bildreihe) als auch künstliche Partikel in einem wassergefüllten Gefäß (untere Bildreihe) »fließen« in die Waagerechte, wenn die Zelle respektive das Gefäß gekippt werden.

keinen Nutzen darin«, sagt der Gravitationsbiologe Markus Braun, der am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt Forschung unter Weltraumbedingungen betreibt. Es sei schon lange bekannt, dass das Aktin-Myosin-Netzwerk in Pflanzenzellen mit den Statolithen in Wechselwirkung trete. »Das Netzwerk fungiert dabei als eine Art Dämpfungssystem, damit die Statolithen nicht zu rasch nach unten sinken; so wird verhindert, dass die Pflanze überzogen schnell auf Bewegungen reagiert.« Aufwärtsbewegungen der Partikel innerhalb der Zelle gebe es zwar, vermittelt vom Myosin, doch spielten sie vermutlich nur eine untergeordnete Rolle. »Es wurde schon mehrfach postuliert, dass die Wechselwirkung des Aktin-Myosin-Netzwerks mit den Statolithen eine leichte Triggerbewegung erzeugt, die die Empfindlichkeit der Schwerkraftwahrnehmung positiv beeinflusst«, räumt Braun ein. Doch das Statolithenensemble deshalb mit einer Flüssigkeit zu vergleichen, hält er für zu weit hergeholt.

Unabhängig davon, wie ergiebig die Arbeit im Hinblick auf die Pflanzenforschung ist – die Wissenschaftler um Forterre sehen darin auch einen Ansatz, um neue Neigungsmesser im Miniaturformat zu entwickeln. Gestützt auf Partikelsuspensionen, die der brownischen Bewegung unterliegen, wären diese nicht durch Grenzflächenspannungseffekte wie bei Wasserwaagen beeinträchtigt und könnten kompakter konstruiert werden als derzeit übliche Geräte mit Pendelkörpern oder Beschleunigungssensoren.

Frank Schubert ist Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

QUELLEN

Béruit A. et al.: Gravisensors in Plant Cells Behave Like An Active Granular Liquid. In: PNAS 115, S. 5123–5128, 2018

Nakamura, M. et al.: An Arabidopsis E3 Ligase, SHOOT GRAVITROPISM9, Modulates the Interaction between Statoliths and F-Actin In Gravity Sensing. In: Plant Cell 23, S. 1830–1848, 2011

3-D-DRUCK WUNSCHOBJEKT AUF KNOPFDRUCK

Das Drucken in drei Dimensionen breitet sich mit rasanter Geschwindigkeit aus. Neue Materialien eröffnen auch für den Privatgebrauch vielfältige Möglichkeiten.

Ein computergesteuertes Gerät setzt in hohem Tempo Schicht für Schicht einer Flüssigkeit oder eines Pulvers aufeinander, bis sich der bis dahin nur als Datei vorhandene Gegenstand manifestiert: Das ist das Prinzip des 3-D-Drucks. Ähnlich wie beim Plotter aus der Frühzeit des Computers ein programmgesteuerter Zeichenstift übers Papier wanderte und an den richtigen Stellen Tinte hinterließ, drückt jetzt eine Düse nach den Anweisungen der Software den heißen, flüssigen Kunststoff auf das anwachsende Objekt, wo er erstarrt und dadurch seine Position behält. Das dauert bei einfachen, zentimetergroßen Gegenständen häufig nur einige Minuten, bei komplizierteren Formen und vor allem größeren Objekten mitunter bis zu mehreren Tagen.

Es handelt sich um einen so genannten additiven Fertigungsprozess, im Gegensatz zu den subtraktiven Methoden, bei denen zum Beispiel aus einem Metallblock nach und nach durch Fräsen, Drehen oder Bohren etwas entfernt wird, bis das gewünschte Bauteil entstanden ist. Im Detail gibt es bei den einzelnen additiven Verfahren etliche Unterschiede, das Prinzip des schrittweisen Hinzufügens eines Materials bleibt jedoch gleich.

Für Produktentwickler war dieser beispiellos kurze Weg von dem virtuellen, am Computer erstellten Gegenstand zu dessen leibhaftiger Realisierung von Anbeginn äußerst

3-D oder 2,5-D?

Streng genommen würde 3-D bedeuten, dass der Druckerkopf jeden Punkt (x, y, z) innerhalb des dreidimensionalen Druckvolumens ansteuern kann – das stimmt – und dort auch Material deponieren kann; Letzteres trifft nur bedingt zu. Der Druckerkopf kann Material nur auf den Boden des Druckbereichs setzen oder auf bereits vorhandenes Material. Man ist also nicht völlig frei in der Wahl der Koordinaten. Objekte, die keine ebene Unterfläche haben, müssen mit stützenden Stegen gedruckt werden, die man in einem weiteren Fertigungsschritt entfernen muss.

Der 3-D-Druck-Experte Jan Giebels zieht es daher vor, der Präzision zuliebe vom 2,5-D-Druck zu sprechen – was selbstverständlich nicht bedeuten soll, dass die Produkte im Sinn der fraktalen Geometrie die gebrochene Dimension 2,5 hätten.

attraktiv. Fortan waren sie in der Lage, Prototypen ohne großen Aufwand als dreidimensionale Anschauungs- und Testobjekte auszudrucken. Aber auch jenseits der Prototypenherstellung ist der 3-D-Druck der konventionellen Massenfertigung in gewissen Situationen klar überlegen:

- ▶ für Einzelstücke, die nach Maß gefertigt werden müssen, wie Implantate oder Prothesen, oder Produkte mit geringen Stückzahlen;
- ▶ wenn es auf rasche Verfügbarkeit bei hohem Transportaufwand ankommt, etwa bei Ersatzteilen für Fahrzeuge oder – ganz extrem – für Raumstationen: An Bord der ISS ist bereits ein 3-D-Drucker zu Testzwecken im Einsatz;
- ▶ bei sehr komplizierten Strukturen, die auf subtraktivem Weg kaum herstellbar sind. Das gilt vor allem für filigrane Bauteile etwa nach dem Vorbild der Knochen oder Insektenflügel, die große Steifigkeit mit geringem Gewicht verbinden.

Schon als das Prinzip in dieser Zeitschrift vorgestellt wurde (**Spektrum** Juni 2014, S. 84 und 92), verbreitete sich die Technik mit großer Geschwindigkeit. Mittlerweile erobert die Technologie auch unerwartete Bereiche.

Autos und Häuser aus dem Drucker

Ausgerechnet ein Massenprodukt wie ein Elektroauto sei wesentlich günstiger zu drucken als konventionell zu fertigen, behauptet etwa die italienische Firma XEV, die sich dafür mit dem chinesischen Materialentwickler Polymaker zusammengetan hat. Nicht das ganze Auto, wohl-gemerkt; Fahrgestell, Räder mit integrierten Motoren, Batterie und Elektrik sowie alle Glasteile müssen nach wie vor auf herkömmliche Weise hergestellt werden. Gleichwohl sinke die Anzahl der Bauteile von 2000 auf 57, und die seien innerhalb von drei Tagen gedruckt und montiert. Im zweiten Quartal 2019 will die Firma ihren smartähnlichen Kleinwagen auf den Markt bringen.

Zahlreiche andere Unternehmen verfolgen ähnliche Konzepte: In Neuseeland soll bald das dreirädrige Elektrovehikel »Drop« über die Straßen rollen, in Österreich das E-Auto »enjoy« in Miniserie gehen. Siemens plant gemeinsam mit der Firma Hackrod gar ein gedrucktes Auto, das der Käufer am Computer selbst designen kann.

Im Hausbau war additive Fertigung schon immer Standard – wer würde schon Wände und Decken aus einem massiven Stein- oder Betonblock fräsen? Insofern erstaunt es, dass der 3-D-Druck hier noch Wesentliches beitragen kann. Genau das behauptet, neben zahlreichen Konkurrenten, die amerikanische Firma ICON. Im März 2018 hat sie in Austin (Texas) ihr erstes Haus gedruckt und nach



Das gedruckte Prototyp-Haus der Firma ICON.

den örtlichen Vorschriften genehmigt bekommen (Bild oben).

An die Stelle des haarfeinen Strahls aus flüssigen Kunststoff, mit dem die herkömmlichen Geräte ihre filigranen Strukturen aufbauen, tritt eine armdicke Betonwurst, und der Druckkopf mitsamt dem Schlauch für die Zufuhr des breiigen Baustoffs wird von einer robusten Mechanik bewegt, die beiderseits des anwachsenden Bauwerks auf Schienen läuft. Der Beton muss sorgfältig zubereitet werden, so dass er einerseits beim Austritt aus der Düse nur minimal davonfließt, andererseits sich noch nach einer Weile problemlos mit der nächsten aufzubrin-

Ein Schlüsselanhänger wird zunächst aus einer Kunststoff-Metall-Mischung gedruckt (oben). Nachdem ihm in zwei Öfen der Kunststoffanteil entzogen wurde, besteht er aus reinem, hartem Metall (unten) und ist um etwa 20 Prozent seines Volumens geschrumpft.

genden Wurstschicht verbindet. Verschalungen erübrigen sich; nur für die Türen und Fenster muss man beizeiten Rahmen an die richtige Stelle setzen. Entsprechend strahlt die fertige Hauswand den rustikalen Charme einer Blockhütte aus – abgesehen davon, dass sich die »Betonbohnen« ohne Weiteres in Kurven legen lassen.

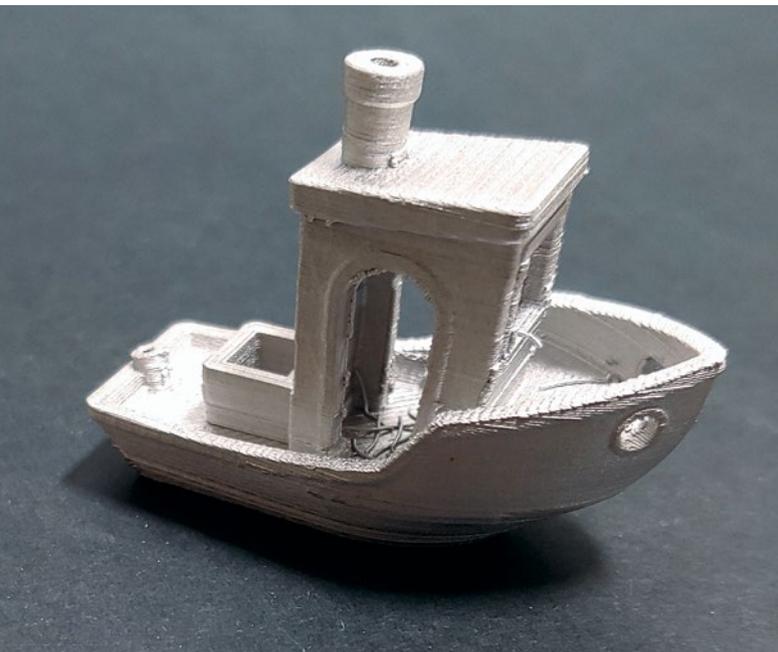
Das Verfahren verspricht, ungeheure Mengen an Bauarbeiterstunden einzusparen; der Rohbau des Hauses in Austin habe nur bescheidene 10000 Dollar gekostet. Merkwürdigerweise will ICON es jedoch nicht vorrangig im eigenen Land anwenden, wo Arbeitskraft vergleichsweise teuer ist. Vielmehr will eine gemeinnützige Organisation namens New Story bis Ende 2019 rund 100 solcher Häuser in El Salvador drucken und so die dortige Wohnraumknappheit bekämpfen, mit Beton aus lokalen Rohstoffen – und einem Drucker mit Notstromaggregat, denn bei einem der häufigen Stromausfälle würde der Brei im Schlauch erstarren und damit das ganze Gerät ruinieren.

Jetzt auch mit Metall

Auch wenn die Technologie immer neue Anwendungsfelder erobert, hat sich an den technischen Prinzipien in den letzten Jahren nicht allzu viel verändert. Ernsthaftige Fortschritte gibt es allerdings im Bereich der Materialentwicklung; die spezielle Betonmischung für das Häuserdrucken ist dabei nicht unbedingt das spektakulärste Beispiel.

Jan Giebels, Inhaber der Firma Conspir3D, die vor allem Unternehmen in Sachen 3-D-Druck berät, sieht die größten Chancen bei metallischen Materialien. Die Idee, nach





Das »3DBenchy« ist ein inzwischen zum Branchenstandard gewordenes Computermodell, entworfen mit dem Ziel, die 3-D-Drucker an ihre Grenzen zu bringen. Hier in Kunststoff-Metall-Mischung gedruckt und gebrannt, lässt es erkennen, dass das Material in Schichten aufgetragen wurde.

dem Vorbild des Kunststoffdrucks geschmolzenes Metall punktgenau auf das wachsende Werkstück aufzubringen, scheitert an den erforderlichen hohen Temperaturen. Vielmehr verschmilzt ein computergesteuerter Laser pulverisiertes Metall an definierten Stellen. Dort härtet das Metall aus, worauf eine weitere Schicht Pulver aufgestreut wird, die der Laser wiederum an den richtigen Stellen schmilzt. Schicht für Schicht lassen sich so fast alle erdenklichen Formen erschaffen. Momentan ist der Metalldruck noch in der Entwicklungsphase, hat jedoch nach Aussage etlicher Fachleute das Potenzial, eine Zeitenwende in der industriellen Fertigung einzuleiten.

Verschiedene Automobilkonzerne und Flugzeugbauer versuchen bereits, auf diesem Weg Bauteile zu fertigen, deren Form und Aufbau mit subtraktiven Verfahren niemals erreicht werden könnte. General Electric druckt seit 2014 Einspritzdüsen für Flugzeugtriebwerke. »Vorher wurde jede Düse aus 19 einzelnen Teilen gefertigt, die alle einzeln überprüft und montiert werden mussten«, erklärt Giebels. Jetzt sei nur noch ein Teil nötig, was die Produktion erheblich vergünstigt.

Der 3-D-Drucker-Hersteller EOS hat einen Ventilblock für die Flugsteuerung des Airbus A 380 entwickelt, der bei gleicher Leistungsfähigkeit 35 Prozent weniger wiegt als die herkömmliche Variante. Die Firma Safran Helicopter Engines baut in einen ihrer Hubschraubermotoren eine neue Brennkammer aus gedruckten Kleinteilen ein, darun-

ter ein Expansionsventil, wodurch man bei geringerem Aufwand in der Fertigung bessere Leistungen erziele. Eine Vielzahl solcher Ansätze befindet sich derzeit in der Entwicklungs- und Erprobungsphase.

Wer mit Metall drucken will, muss nicht unbedingt auf das teure Pulver-Laser-Verfahren zurückgreifen. Mittlerweile bieten manche Hersteller, darunter die BASF, das Metallpulver auch eingebettet in Kunststoff an. Der Kunststoffanteil von etwa 20 Prozent macht die Mischung so geschmeidig, dass sie mit üblichen 3-D-Druckköpfen zu verarbeiten ist. Das gedruckte Produkt steckt man zunächst in einen Ofen, wo in einer sauerstofffreien Schutzgasatmosphäre bei 110 Grad eine Säure den Kunststoffanteil wegätzt – aber nicht ganz. Eine Komponente, der so genannte Binder, bleibt übrig und verklebt die Metallpulverkörnchen notdürftig, bis in einem zweiten Schritt das Metall bei 1400 Grad in einem Sinterprozess verschmilzt, während der Binder verbrennt. Das Ergebnis ist ein geschrumpftes, aber im Übrigen formgetreues Objekt aus reinem Metall mit einer Dichte von 95 bis 98 Prozent des konventionell geschmiedeten Materials (Bilder auf dieser Doppelseite und S. 29, unten). Nachträglich lässt sich das Objekt mit üblichen Verfahren härten. Damit gerät auch der Metalldruck in einen Kostenbereich, der dem Amateur zugänglich ist – auch wenn er für die Nachbearbeitung einen Dienstleister in Anspruch nehmen muss.

Ohnehin wird der Drucker zum Hausgebrauch für immer mehr Leute interessant – und erschwinglich. Laut einer Umfrage des Branchenverbands Bitkom kennen in Deutschland bereits mehr als 90 Prozent der über 14-Jährigen die Technologie, und über die Hälfte kann sich vorstellen, in Zukunft damit zu arbeiten. Noch sind aber für

Ein mit derselben Technik hergestelltes Schaufelrad. Für den Einsatz in der Praxis müsste das Druckprodukt noch geschliffen und poliert werden.





JAN GIEBELS.COM/PROF.COM

Das fertig gedruckte und gebrannte Produkt hält auch die erheblichen Kräfte aus, denen es als Zange ausgesetzt ist.

mehr als 60 Prozent der Befragten die Geräte zu teuer. Das könnte sich jedoch bald ändern, befinden sich doch die Preise im freien Fall: Ein 3-D-Drucker für den Heimgebrauch ist heute bereits unter 150 Euro zu haben.

Nach einer Datenanalyse des Medienunternehmens 3D Printing Industries wurden im Jahr 2017 weltweit eine

halbe Million 3-D-Drucker verkauft, fast die dreifache Stückzahl von 2014. Nach den ersten für 2018 vorliegenden Zahlen dürften die Steigerungsraten der letzten beiden Jahre von immerhin knapp 40 Prozent in diesem Jahr auf mehr als 50 Prozent anwachsen. Für das Jahr 2030 extrapoliert 3D Printing Industries diesen Trend auf rund 50 Millionen verkaufte Geräte weltweit.

Auch die mehr oder minder aufwändige Vorarbeit am Computer wird nach Überzeugung von Jan Giebels künftig immer seltener ein Hindernis darstellen. Zum einen werden die Programme, mit denen man die Druckdatei erstellt, immer nutzerfreundlicher; vor allem aber kann man sich bereits heute zahlreiche Vorlagen aus umfangreichen und frei zugänglichen Datenbanken im Internet herunterladen. Darunter sind auch immer mehr Druckdaten für Alltagsgegenstände zu finden.

Einen Ersatz für den abgebrochenen Kühlschrankgriff wird sich der Normalmensch in naher Zukunft also selbst ausdrucken – und der Kühlschrankhersteller wird seine teure Lagerhaltung bereitwillig zu Gunsten einer Druckvorlage aufgeben, die er dem Kunden gegen geringes Entgelt zum Download anbietet. ◀

Janosch Deeg ist promovierter Physiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Spektrum LIVE

VERANSTALTUNGSREIHE ZUM 40-JÄHRIGEN JUBILÄUM DES VERLAGS SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Tiefenschwindel oder Lebenshilfe – was bringt Psychologie?

Wann? 27. September 2018, 19.30 Uhr | **Wo?** Urania Berlin

In diesem ebenso fundierten wie amüsanten Vortrag erklärt **Gehirn&Geist**-Redakteur Steve Ayan, was Psychologie ist, wo ihre Stärken und Schwächen liegen sowie was ihre Ergebnisse uns nützen.

Der Ursprung des Lebens auf der Erde

Wann? 26. Oktober 2018, 19.30 Uhr | **Wo?** Urania Hamburg

In seinem Vortrag erläutert **Spektrum.de**-Redakteur Lars Fischer, was wir heute über die chemische Evolution wissen – und was nicht.

Tickets und Anmeldungen:

Spektrum.de/live

OZEANOGRAPHIE ZIRKULATION IM NORDATLANTIK SCHWÄCHELT

Gleich zwei aktuelle Studie legen nahe, dass sich die Strömungen im Nordatlantik in den letzten Jahrzehnten verlangsamt haben und heute schwächer sind als jemals zuvor in den letzten 1600 Jahren. Uneins sind die Forscher jedoch darüber, wann der Bremsvorgang einsetzte.

Das warme, salzreiche Wasser des Golfstroms kommt aus der Karibik und beschreibt eine Kurve in nordöstlicher Richtung quer über den Atlantik. Auf halber Strecke geht es in den Nordatlantikstrom über, der sich schließlich südlich von Island verzweigt (siehe Bild unten). In den hohen Breiten kühlt das Wasser stark ab und wird so dichter. Daher sinkt es im Europäischen Nordmeer zwischen Skandinavien und Grönland sowie in der Labra-

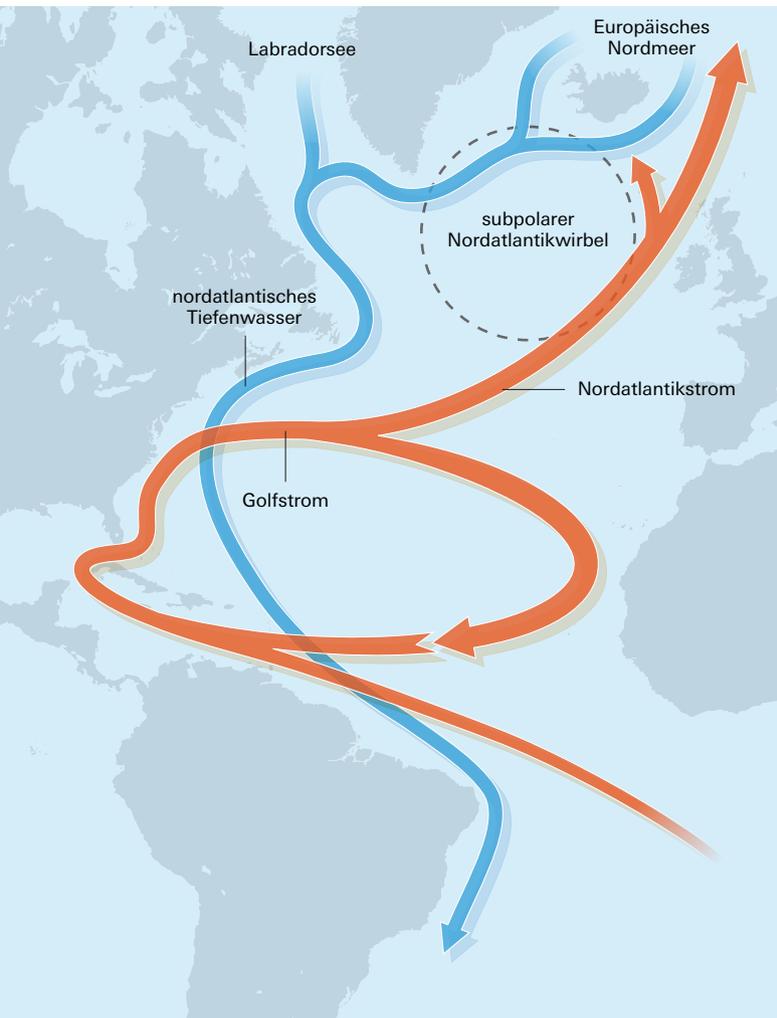
dorsee vor der Ostküste Kanadas in die Tiefe. Dieser vertikale Wassertransport ist Teil der so genannten atlantischen meridionalen Umwälzzirkulation (engl.: atlantic meridional overturning circulation; kurz AMOC) – eine Art Förderband, das im nördlichen Atlantik Wärme in die Atmosphäre entlässt, bevor es kilometertief abtaucht und gen Süden läuft, bis es auf den antarktischen Zirkumpolarstrom trifft.

Für den Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre spielt die AMOC eine wichtige Rolle. Wissenschaftler nehmen daher an, dass Schwankungen der AMOC-Stärke das globale Klima beeinflussen und mit gravierenden klimatischen Veränderungen in der Erdgeschichte zusammenhängen. Messungen zeigen, dass die Geschwindigkeit der nordatlantischen Strömungen im vergangenen Jahrzehnt abgenommen hat. Unklar war jedoch bislang, ob diese Verlangsamung einen Trend widerspiegelt oder lediglich auf die natürliche Variabilität des Systems zurückzuführen ist. Zwei internationale Forscherteams berichten nun, dass sich die Umwälzung der Wassermassen im Nordatlantik bereits seit deutlich längerer Zeit abschwächt. Wann dieser Vorgang genau einsetzte und warum, darüber gehen die Meinungen auseinander.

Schmelzwasser bremst den Golfstrom ab

Wissenschaftler um Levke Caesar vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) verglich die Temperaturen, die seit 1870 im atlantischen Oberflächenozean gemessen wurden, mit hochauflösenden Klimasimulationen. Zwei Meeresregionen zeigten Abweichungen vom langjährigen Mittelwert, die im Computermodell mit einer verminderten AMOC zusammenfielen: der Golfstrom entlang der Ostküste der USA und der so genannte subpolare Nordatlantikwirbel – eine kreisförmige Strömung südlich von Island. Letztere kühlt ab, wenn die Zirkulation im Nordatlantik schwächer wird, während der Golfstrom dadurch wärmer wird, so die Autoren.

Die Studie zeigt, dass dieser gegenläufige Temperatureffekt seit Mitte des 20. Jahrhunderts auftritt. Caesar und ihre Kollegen simulierten ein Klimaszenario mit einem jährlichen CO₂-Anstieg von einem Prozent und erzeugten am Computer so jenes Muster an Temperaturanomalien, das auch in den Umweltdaten zu erkennen war. Danach kalibrierten sie ihr Modell mit den historischen Werten und konnten errechnen, dass die AMOC seit 1950 zirka 15 Prozent an Kraft verloren hat. Wahrscheinliche Ursache: Treibhausgasemissionen. In Folge der Erderwärmung schmilzt



NATURE. PRAETORIUS, S.K. NORTH ATLANTIC CIRCULATION SLOWS DOWN. IN: NATURE 556, S. 180-181, 2018, FIG. 1

Der Golfstrom bringt warmes, salzreiches Wasser aus der Karibik nach Norden. Im Europäischen Nordmeer und in der Labradorsee sinkt dichtes Meerwasser in die Tiefsee hinab und fließt dort Richtung Süden.

das grönländische Eisschild. Der verstärkte Eintrag von Süßwasser im subpolaren Nordatlantik verringert wiederum die Dichte des Meerwassers an der Oberfläche, das nun weniger leicht absinkt. Auf diese Weise könnte das ozeanische Förderband ins Stocken geraten.

Klimaforscher um David J. R. Thornalley vom University College London haben sogar die Schwankungen der AMOC während der letzten 1600 Jahre untersucht. Dafür sammelten sie Sedimentproben in rund 2000 Meter Tiefe vor der Küste North Carolinas, wo das kalte, dichte Wasser aus dem hohen Norden in Richtung Antarktis fließt. Die Tiefenströmung transportiert feinste Partikel (Schluff oder Silt), die sich nur allmählich am Grund des Ozeans absetzen (je kleiner, desto langsamer). Anhand der Korngröße der Partikel in verschiedenen Sedimentschichten konnten die Wissenschaftler die Strömungsgeschwindigkeiten in der Vergangenheit rekonstruieren. Sie verglichen diese mit den Oberflächentemperaturen in der Labradorsee seit dem frühen Mittelalter. Die hatten andere Forscher zuvor ermittelt, indem sie die chemische Zusammensetzung von fossilen Einzellern (Foraminiferen) in flachen Sedimenten analysierten.

Mensch oder Natur als Auslöser?

Thornalley und seine Kollegen fanden heraus, dass die AMOC vom Jahr 400 bis 1850 recht konstant war und erst mit Einsetzen der industriellen Revolution schwächer wurde. Zugleich fällt der Übergang mit dem Ende der Kleinen Eiszeit zusammen, einer Klima-anomalie, die vor allem der Nordhalbkugel mehr als 400 Jahre lang ungewöhnlich kalte Temperaturen bescherte. Vermutlich wurde die AMOC langsamer, weil das vor gut 150 Jahren einsetzende Tauwetter gewaltige Mengen Süßwasser freisetzte, das zuvor in Gletschern und im Meereis gefangen war, so die Wissenschaftler. Auch sie schätzen, dass die nordatlantische Zirkulation heute 15 Prozent weniger Wasser bewegt als im vorindustriellen Zeitalter.

Obwohl die beiden Studien darin übereinstimmen, wie stark die AMOC abgebremst hat, liegen sie hinsichtlich des Startpunkts der Entwicklung etwa ein Jahrhundert auseinander. So kommen die Autoren zu unterschiedlichen Schlüssen, was die Abschwächung ausgelöst hat: Während die Gruppe um Levke Caesar die CO₂-Emissionen der industrialisierten Gesellschaft als treibende Kraft sieht, haben diese nach Ansicht von Thornalley und seinen Mitstreitern lediglich einen Prozess verstärkt, der durch natürliche Klimaschwankungen bereits viel früher in Gang kam. Dessen ungeachtet sorgt in beiden Szenarien mehr Süßwasser dafür, dass der Salzgehalt im Nordatlantik sinkt und das Förderband an Fahrt verliert.

Angesichts der verschiedenen Herangehensweisen überrascht es nicht, dass die Arbeiten zu abweichenden Ergebnissen kommen: Die Forscher um Levke Caesar näherten sich dem Problem »top-down« (von oben nach unten). Sie rekonstruierten die Oberflächentemperaturen für den Nordatlantik und den globalen Ozean aus historischen Messwerten und leiteten daraus das Abbremsen

der AMOC ab. Es wäre jedoch denkbar, dass langjährige Temperaturschwankungen in Regionen außerhalb des Nordatlantiks die mittlere Temperatur der weltweiten Meeresoberfläche beeinflussen, die als Grundlage für die Berechnung der AMOC dient. Dagegen spricht laut der Autoren allerdings die robuste Kälteanomalie im subpolaren Nordatlantikwirbel im Vergleich mit der durchschnittlichen Oberflächentemperatur im globalen Ozean.

Worst-Case-Szenario: Das grönländische Eisschild schmilzt, bis das Förderband stillsteht

Die zweite Forschergruppe begegnete dem Problem »bottom-up« (von unten nach oben). Sie nutzte die Korngröße von Sedimentpartikeln als Indikator für die Strömungsgeschwindigkeit und konnte die Stärke der Umwälzzirkulation in der Vergangenheit so direkter abschätzen. Der Schwachpunkt dieses Ansatzes: Er stützt sich allein auf die bodennahe Strömung an den Stellen, wo die Sedimentproben gesammelt wurden. Und die repräsentieren nicht zwingend das gesamte Tiefenförderband. Darüber hinaus könnte hier auf Grund geografischer Verschiebungen der AMOC mal mehr, mal weniger Tiefenwasser vorbeigeflossen sein. Dennoch zeigt das Team um Thornalley, dass Partikelgröße, die Dichte des Wassers in der Labradorsee (das einen Großteil des Tiefenstroms ausmacht) und die Wärmemenge, die der subpolare Nordatlantikwirbel speichert, auffallend gut korrelieren – was daraufhin deutet, dass die lokalen Veränderungen tatsächlich auf einem großräumigen Wandel der Ozeanzirkulation beruhen.

Die Frage, wann genau die AMOC anfang zu schwächeln, bleibt vorerst ungelöst. Aber aus wissenschaftlicher Sicht es ist beruhigend zu sehen, dass Einigkeit darüber herrscht, dass die AMOC heute kraftloser ist als in den zurückliegenden Jahrhunderten. Weniger beruhigend ist diese Erkenntnis angesichts der Prognosen für das globale Klima. Sollte die AMOC zukünftig weiter abbremsen, könnte das die Temperaturen und die Niederschläge auf der Nordhalbkugel erheblich beeinflussen. Im schlimmsten Fall könnte die Erderwärmung das grönländische Eisschild abtauen, bis das nordatlantische Förderband völlig stillsteht. ◀

Summer K. Praetorius ist Klimaforscherin beim US Geological Survey in Menlo Park, Kalifornien.

QUELLEN

Caesar, L. et al.: Observed Fingerprint of a Weakening Atlantic Ocean Overturning Circulation. In: *Nature* 556, S. 191–196, 2018

Thornalley, D. J. R. et al.: Anomalously Weak Labrador Sea Convection and Atlantic Overturning during the past 150 Years. In: *Nature* 556, S. 227–230, 2018

nature

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 556 S. 180–181, 12. April 2018



SPRINGERS EINWÜRFE VON DATEN ZU TATEN

Lernfähige Algorithmen schätzen bereits die individuelle Disposition für künftige Verbrechen ab. Dabei werden auch Unschuldige vorverurteilt.

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/1573434

Wir kennen das aus Krimis: Findet die Polizei am Tatort eine DNA-Spur, durchforstet sie die forensischen Dateien nach einem passenden genetischen Fingerabdruck – doch nur dann mit Erfolg, wenn der Gesuchte schon bei einer früheren Straftat identifiziert wurde. Im Zeitalter von Big Data muss diese Einschränkung nicht mehr gelten. Seit Familienforscher genealogische Datenbanken füttern und Gesundheitsbewusste ihre ererbten Krankheitsrisiken recherchieren, entsteht eine Unmenge nichtforensischer Daten. Darin kann sich die Signatur eines noch unerkannten Täters verbergen. Der polizeiliche Zugriff auf solche Privatdaten ist zwar rechtlich umstritten, findet aber in den USA bereits statt (*Science* 360, S. 1078–1079, 2018).

Verlockend für Kriminalisten ist jedoch nicht nur das wachsende Meer persönlicher Informationen, sondern auch die Aussicht, sich bei der Ausfahrt in den Datenozean mit Hilfe von lernfähigen Algorithmen zu orientieren. Sie übernehmen die Abschätzung des Risikos künftiger Taten.

Der Fachausdruck lautet Predictive Policing. Nicht zuletzt auf vorausschauende Polizeiarbeit mit dem kürzlich abgeschlossenen Projekt SKALA (System zur Kriminalitätsauswertung und Lageantizipation) führt die Polizei in Nordrhein-Westfalen den merklichen Rückgang der Wohnungseinbrüche zurück. Unter dem Aspekt des Datenschutzes erscheint das statistische Ermitteln krimineller Hotspots zunächst unbedenklich: Dort verstärkt die Polizei bloß die Patrouillen.

Doch Predictive Policing will viel mehr. Eine Pilotstudie in Pittsburgh (US-Bundesstaat Pennsylvania) nutzt private Daten über Familienhintergrund und kriminelle Vergangenheit, um mit intelligenter Software das Risiko von Kindesmissbrauch zu bewerten. Dabei geraten unweigerlich immer wieder Unschuldige in Verdacht und werden oft dauerhaft stigmati-

siert. Außerdem reproduzieren die Algorithmen soziale Vorurteile. Wer zu der in US-Gefängnissen überrepräsentierten schwarzen Minderheit gehört, arm ist oder bloß in einer »schlechten« Nachbarschaft wohnt, wird eher als Beifang im Netz der automatischen Rasterfahndung hängen bleiben (*Nature* 558, S. 357–360, 2018).

Um dem entgegenzuwirken, müssten die Algorithmen fair und transparent sein – doch das ist leichter gesagt als getan. Fair? Die Suchmaschinen reproduzieren das gängige Bild, das die Gesellschaft von sich hat; sie verschärfen wie in einer Rückkopplungsschleife das herrschende Vorurteil zur automatischen Vorverurteilung. Mehr Fairness würde zwar diesen Automatismus hemmen und Unschuldige schonen, dafür aber vermutlich die Erfolgsquote mindern.

Transparent? Die lernfähige Maschine wird selbst für ihren Konstrukteur mit der Zeit zur undurchschaubaren Blackbox. Ein weiteres Transparenzproblem, das gar nicht von der künstlichen Intelligenz (KI) selbst herrührt, haben die Statistik- und KI-Experten Gerd Gigerenzer, Klaus-Robert Müller und Gert G. Wagner kürzlich in einer Art offenem Brief hervorgehoben: Die Algorithmen sind in der Regel das Geschäftsgeheimnis von Privatfirmen – etwa der deutschen Schufa, die damit die Kreditwürdigkeit bewertet, oder der US-Firma Compas, welche die Wahrscheinlichkeit voraussagt, mit der ein Angeklagter in den nächsten zwei Jahren eine Straftat begehen wird (*FAZ* vom 22. Juni 2018).

Als Lösung schlagen Gigerenzer, Müller und Wagner eine »Transparenz-Schnittstelle« vor, an der Experten wenigstens stichprobenartig die Entscheidungen der privatisierten Netze nachvollziehen und Diskriminierungen reduzieren könnten. Höchste Zeit, eine – in Deutschland bereits geplante – KI-Ethikkommission einzurichten und dort die Vorschläge zu diskutieren.

MEDIZIN TUMOR MIT STAMMBAUM

Krebszellen können ihren Ursprungsort verlassen, durch den Organismus wandern und in anderen Geweben Tochtergeschwulste bilden. Dies geschieht oft schon früher als bislang vermutet – ein Ansatzpunkt für neue, wirkungsvolle Therapien.



Jeffrey P. Townsend ist Associate Professor an der Yale University in New Haven, USA. Er befasst sich mit Biostatistik, Ökologie und Evolutionsbiologie.

» spektrum.de/artikel/1573436

▶ Seit Langem nutzen Evolutionsbiologen genetische Analysen, um die Verwandtschaftsverhältnisse zwischen Lebewesen aufzuklären. Dabei untersuchen sie verschiedenste Organismen, vom Seidenäffchen bis zum Bakterium. Wir Menschen stellen im Stammbaum des Lebens einen Seitentrieb des Zweigs der Affen dar. Dabei sind wir nichts anderes als eine riesige Ansammlung von Zellen, die gemeinsam unseren Körper bilden.

Normalerweise halten sich unsere Körperzellen an einige Grundregeln, die sich mittels Mutation und Selektion schon vor 600 Millionen Jahren herausbildeten, als die ersten vielzelligen Lebewesen auftauchten. Sie müssen ihre DNA reparieren, sofern diese beschädigt ist; sie müssen ihre Teilungsaktivität mit den anderen Zellen abstimmen und – sofern sie Teil eines soliden Organs sind – in ihrem angestammten Gewebeverband bleiben. Veranlassen genetische Mutationen eine Körperzelle dazu, diese Regeln zu missachten, sich beispielsweise unaufhörlich zu teilen und in andere Gewebe einzudringen, werden sie meist schon nach kurzer Zeit ausgemerzt. Denn die betroffenen Zellen erkennen ihre Fehlfunktion

Eine Leber mit einer Metastase. Das Organ wurde einem Krebspatienten entnommen und enthält die Tochtergeschwulst (weißlich) eines Prostata Tumors. Die Erkrankung ist in diesem Stadium weit fortgeschritten.





AUF EINEN BLICK PATHOLOGISCHE VERWANDTSCHAFT

- 1** Gestützt auf Gensequenzen können Forscher so genannte Tumorstammbäume erstellen. Diese zeigen, wie aus dem ursprünglichen Tumor Tochtergeschwulste (Metastasen) hervorgehen.
- 2** Frühe Mutationen in Schlüsselgenen scheinen sowohl für die Entstehung des Primärtumors als auch seiner Metastasen verantwortlich zu sein.
- 3** Therapien, die an solchen Schlüsselgenen ansetzen, könnten sich als sehr effektiv erweisen. Zudem hoffen Mediziner, mit evolutionären Strategien das Problem arzneimittelresistenter Tumoren in den Griff zu bekommen.

entweder von sich aus und aktivieren den programmierten Zelltod oder sie werden vom Immunsystem vernichtet, bevor sie allzu viel Schaden anrichten.

Gelegentlich kommt es jedoch zu Mutationen, deren Auswirkungen dem zelleigenen Überwachungssystem sowie der Immunkontrolle entgehen. Dann wächst ein Tumor heran und verdrängt das umliegende Gewebe, was zu schweren Organschäden bis hin zum Tod führen kann. Der Tumor ist seinerseits nicht homogen, sondern besteht aus verschiedenen stark entarteten Zellen, die untereinander in evolutionärem Wettbewerb stehen.

Forscher kennen diverse genetische Veränderungen, die das Entstehen eines Tumors begünstigen, und können damit auch Risikofaktoren wie das Rauchen benennen. Richtig gefährlich wird es allerdings, wenn die Wucherung nicht nur ständig weiterwächst, sondern sich auch noch Tochtergeschwulste (Metastasen) in anderen Organen ansiedeln, was Mediziner als Metastasierung bezeichnen. Dabei wandern Zellen des ursprünglichen Primärtumors in fremde Gewebe ein und bringen weitere Tumoren hervor.

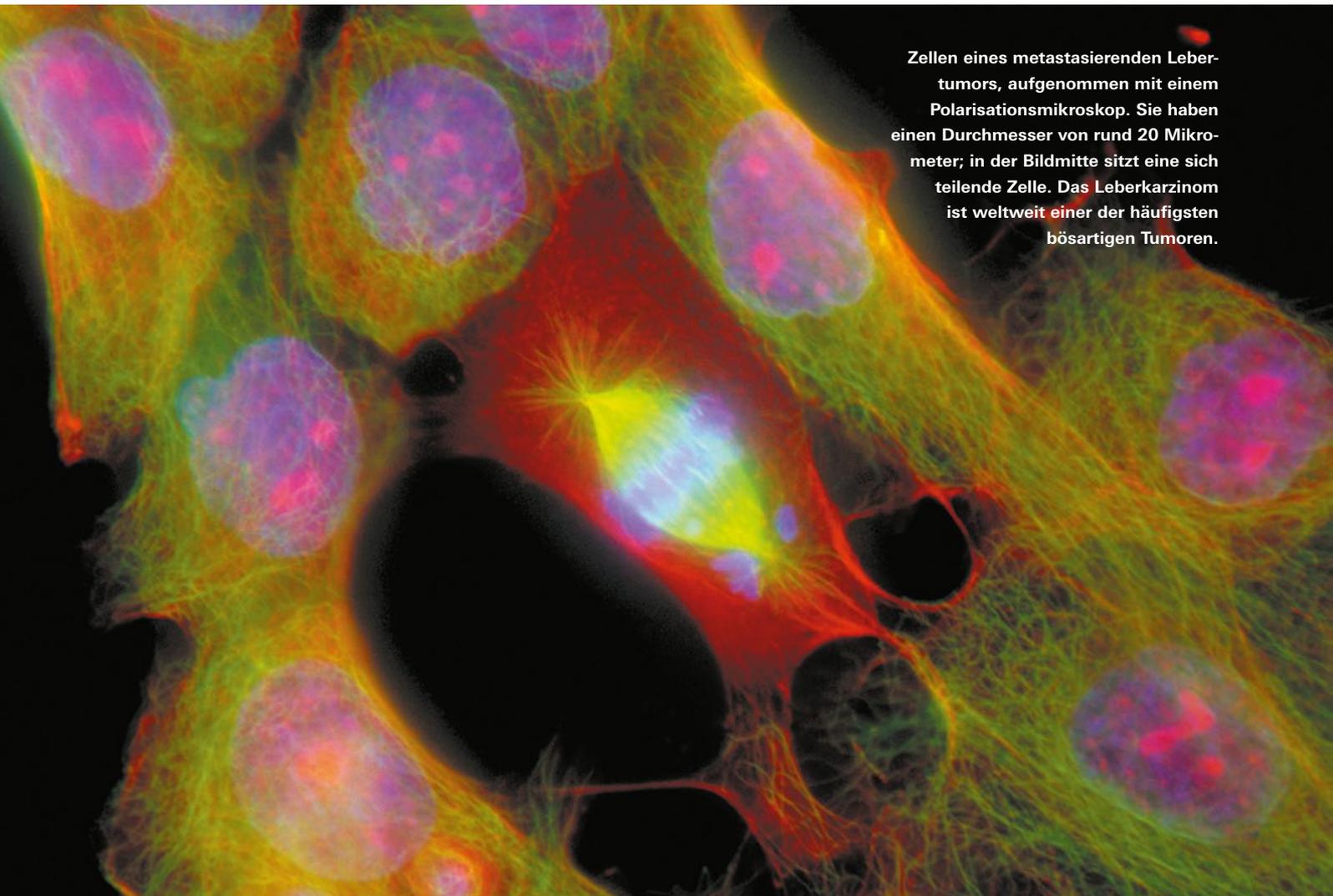
Krebsmediziner haben lange vermutet, dass es bestimmter Mutationen bedarf, um die Zellen des Primärtumors zur Metastasierung zu befähigen, und dass diese erst relativ spät während seiner Entwicklung auftreten. Onkologen versuchen schon seit geraumer Zeit herauszufinden, welche Mutationen das sind, um Behandlungsansätze dagegen zu entwickeln. Seit etwa 2010 sind wir in der Lage, das komplette Genom eines Menschen zu relativ

geringen Kosten zu sequenzieren, also die Abfolge seiner Nukleotide zu ermitteln, in der die Erbinformation verschlüsselt ist. Es dauerte nicht lange, bis Forscher die Sequenzierungstechnik dafür zu nutzen begannen, auch die Genome von Tumorzellen zu entschlüsseln. Zu ihrer Bestürzung fanden sie heraus, dass sich sogar Tumoren von ein und demselben Patienten aus diversen Zellsorten zusammensetzen, deren Mutationen sich mitunter sehr stark voneinander unterscheiden. Das erschwert es, den Krebs mit Medikamenten gezielt anzugreifen.

Den Hergang der Erkrankung rekonstruieren

Evolutionenbiologen wie ich betrachten diese genetische Diversität jedoch als Quell wertvoller Informationen. Meine Kollegen an der Yale University sowie anderen Einrichtungen und ich entschieden uns vor einigen Jahren, die zeitliche Entwicklung von Krebserkrankungen genauer zu untersuchen. Hierfür sequenzierten wir Genome von Primärtumoren und deren Metastasen – und dort jeweils die Abschnitte, von denen bekannt ist, dass sie die Herstellung von Proteinen steuern und somit die Merkmale der Zellen bestimmen. Anhand der gewonnenen Daten erstellten wir Stammbäume, die uns einen Eindruck davon geben, wann die verschiedenen krebsrelevanten Mutationen erstmals aufgetreten sind und zu welchem Zeitpunkt die Tochtergeschwulste aus dem Primärtumor hervorgingen. Die Verzweigungen eines solchen Stammbaums illustrieren das Ausmaß, in dem sich das Erbgut der Krebs-

SCIENCE SOURCE / JENNIFER WATERS SHULER



Zellen eines metastasierenden Lebertumors, aufgenommen mit einem Polarisationsmikroskop. Sie haben einen Durchmesser von rund 20 Mikrometer; in der Bildmitte sitzt eine sich teilende Zelle. Das Leberkarzinom ist weltweit einer der häufigsten bösartigen Tumoren.

zellen verändert, während der Tumor von einem winzigen Zellhaufen zu einem metastasierenden Monster heranwächst.

Unsere Untersuchungen belegen, dass zwischen dem Primärtumor und den Metastasen vielfältige und oft chaotische Verwandtschaftsbeziehungen bestehen. Wirklich überraschend ist, dass die ersten Äste dieses Stammbaums bereits äußerst früh abzweigen. Offenbar setzt sich der Primärtumor schon viele Jahre, bevor er diagnostiziert wird, aus genetisch unterschiedlichen Zellen zusammen. Einige haben das Potenzial, sich zu aggressiven Varianten zu entwickeln, wobei jede ihren eigenen genetischen Mechanismus entwickelt, der ihr die Metastasierung ermöglicht.

Diese Erkenntnis ist einerseits erschreckend, andererseits aber bietet sie die Chance auf neue, wirksame Therapieansätze. Denn statt sich auf spät auftretende Mutationen zu konzentrieren, sollten Krebsmediziner vor allem solche Gene in den Fokus nehmen, die bereits während der frühen Entwicklungsstadien des Primärtumors mutieren und somit die weitere Evolution der entarteten Zellen maßgeblich bestimmen. Arzneistoffe, die auf solche Erbanlagen zielen, könnten Krebspatienten bessere Heilungschancen bieten.

Jahrzehntelang waren Krebsforscher von einem linearen Modell der Tumorevolution ausgegangen. Demnach bringt eine bestimmte Abfolge von Mutationen den Primärtumor hervor. Erst später, so das Modell, erfahren einige seiner Zellen weitere genetische Veränderungen, die sie dazu befähigen, durch den Organismus zu wandern, sich woanders anzusiedeln und Metastasen zu bilden. Dieser Vorstellung zufolge müsste ein evolutionärer Tumorstammbaum aussehen wie eine typische Graspflanze: lang gestreckt, mit einem einzelnen Halm, an dessen oberem Ende einige Seitentriebe abzweigen.

Dieses Modell passt nicht zu den Erkenntnissen, die Evolutionsbiologen über die Stammesgeschichte gewonnen haben. Das unablässige Einwirken von Mutation und Selektion treibt die Organismen dazu, sich auseinanderzuentwickeln. Dabei entstehen keine homogenen Populationen, sondern es bildet sich eine Vielfalt von Abstammungslinien. Tatsächlich haben Studien, etwa von Marco Gerlinger vom Institute of Cancer Research in London, schon vor Jahren gezeigt, dass Zellen aus verschiedenen Regionen ein und desselben Primärtumors unterschiedliche Gensequenzen aufweisen.

Im Jahr 2010 gingen meine Mitarbeiter und ich zusammen mit weiteren Kollegen von der Yale University daran, drei Fragen zu beantworten, die aus diesen Beobachtungen resultieren. Erstens, bedarf es einer oder mehrerer spezifischer genetischer Veränderungen, damit es zur Metastasierung kommt, und sind diese Veränderungen bei allen Patienten nachweisbar? Zweitens, können metastasierende Zelllinien schon in frühen Entwicklungsstadien des Primärtumors abzweigen, bevor sich die meisten Mutationen in den entarteten Zellen angesammelt haben? Drittens, falls sich Primärtumor und Metastasen in ihrer Mutationslast unterscheiden, können wir dann mit Hilfe evolutionärer Stammbäume berechnen, wann diese Unter-

schiede sichtbar werden – und wann sich Tochter Tumoren bilden? Die Antworten darauf, davon waren wir überzeugt, würden ein Licht auf die genetischen Entwicklungspfade einer Krebserkrankung werfen.

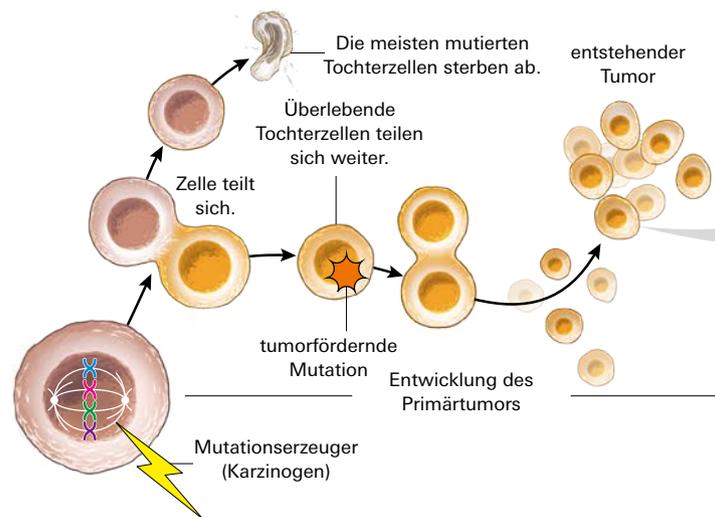
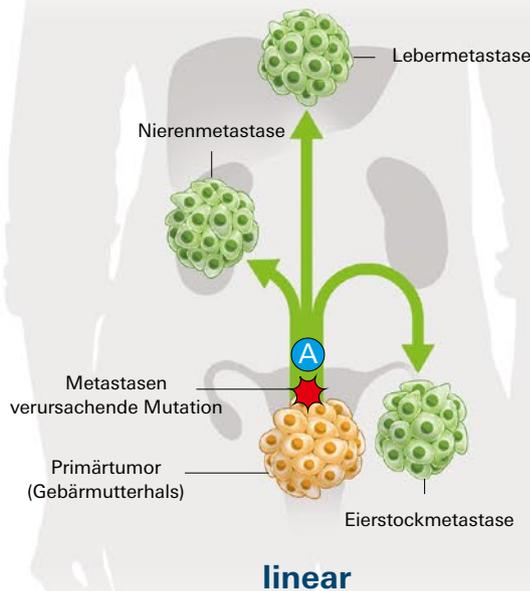
Der Pathologe David Rimm beschaffte Gewebeproben von 40 Patienten, die an 13 verschiedenen Krebsarten gestorben waren. Diese Proben waren bei Autopsien entnommen worden und stammten jeweils aus den Primärtumoren und den Metastasen sowie aus benachbartem gesunden Gewebe. In jeder Probe sequenzierten wir sämtliche Teile des Genoms, die in irgendeinem Körpergewebe zu irgendeinem Zeitpunkt exprimiert werden. Dabei fanden wir heraus, dass das Erbgut der Krebszellen dutzende bis tausende Mutationen aufwies, verglichen mit dem Keimbahngenom des jeweiligen Patienten, das er oder sie von den Eltern geerbt hatte.

Um sichtbar zu machen, wie die Krebszellen in diesen Proben miteinander verwandt waren, nutzte ein Mitarbeiter von mir unsere Sequenzdaten, um daraus so genannte phylogenetische Bäume zu erstellen. Diese Abbildungen dienen in der Evolutionsbiologie etwa dazu, unser Verwandtschaftsverhältnis zu Schimpansen, Gorillas und Orang Utans darzustellen. Man kann damit ebenso die evolutionären Beziehungen zwischen Säugern und Vögeln veranschaulichen, oder auch die zwischen Tieren, Pilzen, Pflanzen und Bakterien. Indem Wissenschaftler die Merkmale von Lebewesen (oder besser deren Genomsequenzen) miteinander vergleichen und die Unterschiede dokumentieren, erstellen sie einen phylogenetischen Stammbaum, der die beobachteten Unterschiede am besten wiedergibt.

Krebszellen und ihre Vorfahren existieren im selben Organismus gemeinsam weiter

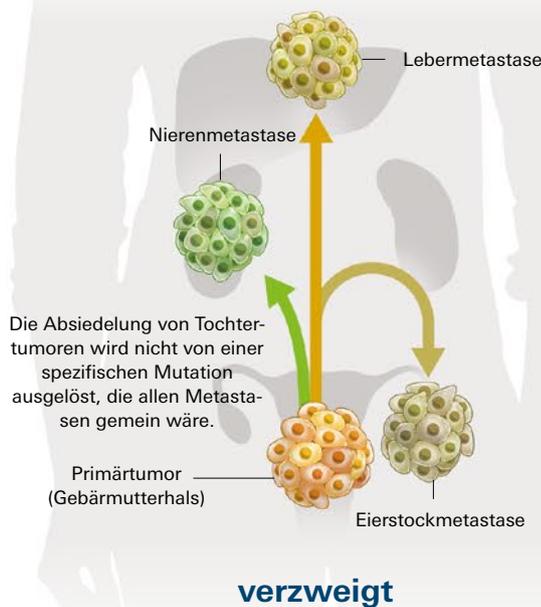
Dieses Verfahren auf Tumoren und Metastasen anzuwenden, bringt allerdings gewisse Probleme mit sich. Üblicherweise nutzen Evolutionsbiologen die Sequenzdaten heutiger Organismen und versuchen, daraus auf deren (ausgestorbene) Vorfahren zu schließen. Im Fall eines Tumorstammbaums kennen wir die Erbinformation des Vorfahren jedoch: Es ist die Keimbahnsequenz des gesunden Gewebes. Der herkömmliche Ansatz zum Erstellen eines phylogenetischen Baums würde die Keimbahnsequenz aber wie die eines weiteren Nachfahren behandeln und damit Stammbäume produzieren, die nicht die tatsächliche Entwicklungsgeschichte repräsentieren. Wir modifizierten das Verfahren deshalb so, dass wir die Erbinformation des gesunden Gewebes als Vorgänger der Primärtumor- und Metastasensequenzen definieren konnten. Auf diese Weise gelang es uns, phylogenetische Bäume zu erstellen, die den Verlauf der Tumorevolution mit hoher Wahrscheinlichkeit korrekt wiedergeben.

Unsere Stammbäume zeigten etwas Erstaunliches. Dem linearen Modell der Tumorevolution zufolge sollten alle Metastasen aus einer einzelnen Zelllinie hervorgehen, die sich vom Primärtumor löst und in andere Körperregionen vordringt. Würde Metastasierung dementsprechend erst durch spezifische Mutationen ermöglicht, die am Ende einer langen Reihe krebsrelevanter genetischer Verände-

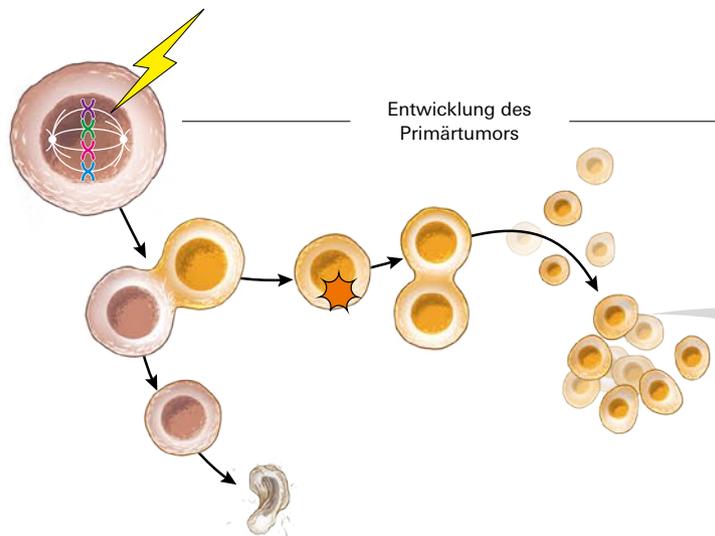


Zwei Modelle der Tumorevolution

Was eine Krebserkrankung lebensbedrohlich macht, ist meist nicht so sehr das lokale Wachstum des Primärtumors, sondern der Umstand, dass er in andere Organe streut. Dabei lösen sich Krebszellen aus dem Gewebe des Primärtumors, wandern durch den Organismus, siedeln sich in zuvor gesunden Geweben an und bilden dort Tochtergeschwulste. Das lineare Modell der Tumorevolution hat Onkologen lange Zeit nach Mutationen suchen lassen, die für die Metastasierung verantwortlich seien und daher als Angriffsziele für Therapien dienen könnten. Wie phylogenetische Bäume zeigen, passt das lineare Modell jedoch nicht zu den Gensequenzen der Krebszellen. Statt dass eine oder mehrere bestimmte Mutationen die Metastasenbildung auslösen, entstehen innerhalb des Primärtumors immer wieder neue Zelllinien, die streuen – manche früher, andere später. Diese Linien sind genetisch mitunter sehr verschieden, was darauf hindeutet, dass die Absiedelung von Tochtergeschwulsten keine spezifischen Genveränderungen voraussetzt. Effektive Krebstherapien sollten deshalb an jenen (mutierten) Genen angreifen, welche die Tumorentwicklung an sich vorantreiben.



Die Absiedelung von Tochter-tumoren wird nicht von einer spezifischen Mutation ausgelöst, die allen Metastasen gemein wäre.



Zelle innerhalb des wuchernden Primärtumors

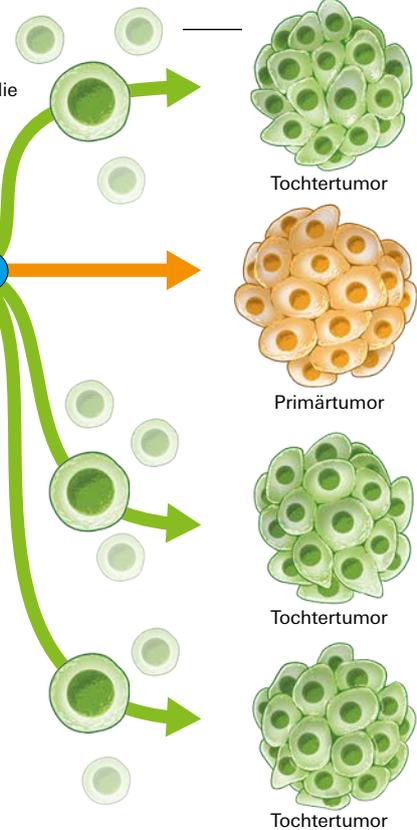
Weitere Mutationen treiben die Tumorentwicklung voran.

Zusätzliche Mutation löst die Metastasenbildung aus.

Zeit ▶

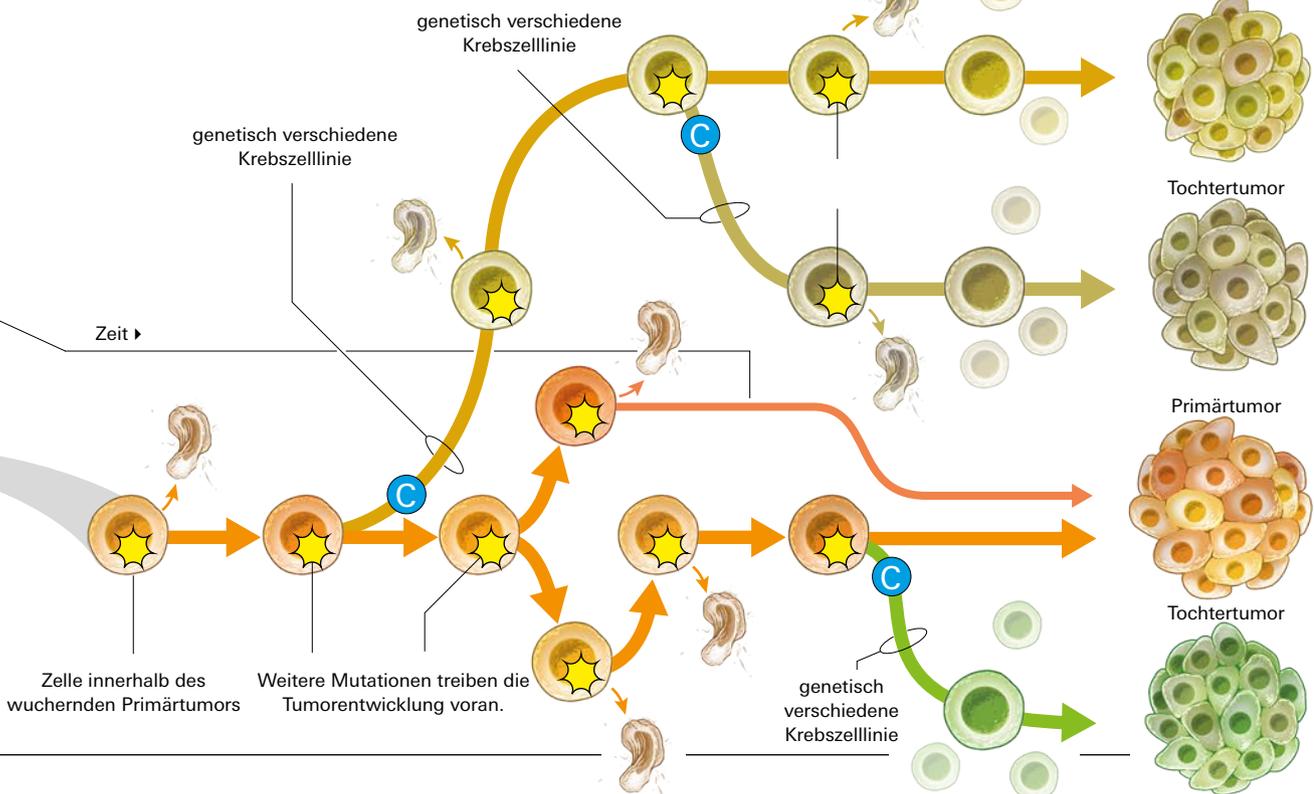
Das lineare Modell

Jahrzehntlang waren Krebsforscher davon überzeugt, dass die Entstehung eines Tumors auf einer bestimmten Abfolge von Mutationen beruht. Erst nachdem sie diese genetischen Veränderungen erfahren hatten, so die Vorstellung, würden einige Zellen des ursprünglichen Tumors eine oder mehrere weitere Mutationen erwerben, die es ihnen ermöglichen, Metastasen zu bilden. Wuchert beispielsweise eine Geschwulst im Gebärmutterhals, könnte eine einzelne zusätzliche Mutation **A** einige ihrer Zellen metastasieren lassen und es dem Tumor somit erlauben, in Leber, Niere und Eierstöcke zu streuen. Diesem so genannten linearen Modell zufolge müssten alle Metastasen aus einer einzelnen Zelllinie des Primärtumors hervorgehen **B**.



Das verzweigte Modell

Phylogenetische Bäume von Krebszellen zeigen, dass mehrere verschiedene Zelllinien des Primärtumors **C** in andere Organe streuen. Aus diesem Grund sind einige Metastasen dem Primärtumor genetisch ähnlicher als anderen Tochtertumoren. Daraus folgt: Krebstherapien sollten nicht so sehr auf späte Mutationen abzielen, von denen man vermutete, sie würden die Metastasierung auslösen. Bessere Erfolge könnten sich mit Arzneistoffen einstellen, die an Schlüsselgenen angreifen, deren mutierte Formen sowohl die Entwicklung des Primärtumors als auch seiner Tochtergeschwulste vorantreiben.



MATTHEW TWOMBLY / SCIENTIFIC-AMERICAN/APRIL 2016; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

rungen stehen, dann müssten die Zellen der Metastasen sich untereinander genetisch ähnlicher sein als den Zellen des Primärtumors.

Doch das war nicht der Fall. Vielmehr belegten die Tumorstammbäume bei mehr als jedem dritten Patienten, dass der Primärtumor mit einigen Metastasen genetisch eng verwandt war, mit anderen hingegen nicht. Demzufolge hatte der ursprüngliche Tumor nicht nur eine einzige Zelllinie enthalten, die irgendwann zu streuen begann, sondern es hatte mehrere davon gegeben, und sie waren zu unterschiedlichen Zeitpunkten dazu übergegangen, Tochtergeschwülste zu bilden. Mit anderen Worten, das lineare Modell der Tumorevolution passt nicht zu den Beobachtungen. Statt dass ein einzelnes, seltenes Mutationsereignis die Metastasierung in Gang setzt, scheinen Krebszellen mehrfach unabhängig voneinander die Fähigkeit zum Streuen zu erlangen – und dies zum Teil schon in frühen Erkrankungsstadien und im Zuge der gleichen genetischen Veränderungen, die auch das Wachstum des Primärtumors vorantreiben.

Es gelang uns nicht, ein einzelnes Gen zu identifizieren, das für die Metastasierung verantwortlich gemacht werden könnte. Außer solchen Erbanlagen, deren mutierte Formen schon lange als Krebstreiber bekannt sind – etwa *KRAS*, das in den Primärtumoren praktisch aller Pankreaskarzinompatienten verändert ist –, gab es kein einziges Gen, das in den Metastasen verschiedener Patienten gleichermaßen modifiziert vorgelegen hätte. Vielmehr ließen sich die Mutationen der metastasierenden Zelllinien nicht von denen jener Zellen unterscheiden, die den Primärtumor nie verlassen hatten. Ob eine entartete Zelle Tochtertumoren hervorbringt oder nicht, scheint demnach nicht von spezifischen Mutationen abzuhängen. Andere Faktoren, etwa epigenetische Veränderungen oder auch die jeweilige Mikroumgebung der Zelle, könnten hier den Ausschlag geben.

verlassen, selbst wenn sie auf Grund ihrer Mutationen dazu prinzipiell in der Lage wären. Ob ein Tumor also streut oder nicht, hat nicht ausschließlich mit seiner Mutationslast zu tun.

Nachdem uns klar geworden war, dass die Zellen eines Primärtumors mehrfach unabhängig voneinander die Fähigkeit erwerben können, zu streuen, fragten wir uns, ab welchem Zeitpunkt während der Tumorentwicklung metastasierende Zelllinien auftreten. Unsere molekularen Stammbäume beantworteten dies nicht: Die Länge ihrer Äste repräsentiert keine Zeitdauer, sondern die Anzahl der Mutationen, in denen sich die jeweiligen Tumorzellen voneinander unterscheiden. Daher griffen wir auf eine weitere Methode der Evolutionsbiologie zurück, das Konstruieren von »Zeitbäumen«, um die Tumorevolution im menschlichen Körper nachzuvollziehen. Anders als bei einem molekularen phylogenetischen Baum entspricht die Astlänge eines Zeitbaums der Dauer, bis sich eine neue Spezies von ihrer Vorläuferart abgespalten hat. Ein solches Diagramm erhält man, wenn man die Merkmale der fraglichen Spezies (etwa ihre Genomsequenzen) miteinander vergleicht und mit zeitlichen Informationen verknüpft, etwa mit Mutationsraten. Evolutionsforscher haben dies unter anderem auf Fossilfunde angewendet und so herausgefunden, dass die »Kambrische Explosion«, das beinahe gleichzeitige erste Auftreten von Vertretern fast aller heutigen Tierstämme, vor rund 550 Millionen Jahren stattfand.

Schnappschüsse der Tumorevolution erlauben es, die Mutationsrate abzuschätzen

Natürlich finden sich im Körper eines Krebspatienten keine Fossilien, anhand derer wir den Verlauf der Tumorevolution zeitlich kalibrieren könnten. Doch wir hatten bei vielen Patienten etwas Besseres hierfür, nämlich Gewebeproben des Primärtumors, die vor der Autopsie entnommen worden waren. Zudem konnten wir auf die Krankenakten zurückgreifen und ihnen die Zeitdaten zu Geburt, Diagnose, Biopsien-Gewinnung, operativer Entfernung des Tumors und zur Autopsie entnehmen. Sie dienten uns als Kalibrierungspunkte: Die Krebserkrankung konnte sich beispielsweise nicht vor dem Geburtsjahr manifestiert haben, musste aber bereits vorliegen, als der Primärtumor diagnostiziert wurde. Gewebeproben genauso wie chirurgisch entnommene Tumoren und Metastasen lieferten uns Schnappschüsse der Tumorevolution, mit deren Hilfe wir die Mutationsrate abschätzen konnten. Zudem nutzten wir publizierte Daten zur typischen Zellteilungsrate in Primärtumoren – ursprünglich erhoben von Radiologen, um die Strahlendosis zu ermitteln, die zur Zerstörung einer Geschwulst erforderlich ist.

Ein Postdoktorand in meiner Gruppe führte all diese Informationen zusammen, um die molekularen phylogenetischen Bäume in zeitliche umzuwandeln. Damit erhielten wir einen ersten Einblick darin, wie die Evolution einer Tumorerkrankung mit dem Alter des jeweiligen Patienten und der Dauer seiner Therapie zusammenhängt. So konnten wir abschätzen, wann die ersten Mutationen auftraten, die entartetes und gesundes Gewebe voneinander schieben. Bei jüngeren Krebspatienten hatten sie sich meist nur



FOTOLIA / SEBASTIAN KAULITZKI

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Vorstellbar wäre etwa, dass einige Zellen des Primärtumors verstärkt in Kontakt mit einem Karzinogen kommen, was epigenetische Veränderungen an ihrem Erbgut verursacht und somit ihre Neigung zum Metastasieren erhöht. Von großer Bedeutung ist dabei jedoch, wo eine Zelle im Tumorgewebe sitzt. Zellen, die sich in der Nähe eines Blutgefäßes oder einer Lymphbahn befinden, dringen mit höherer Wahrscheinlichkeit ins Kreislauf- oder Lymphsystem ein, von wo aus sie sich im Organismus verbreiten können. Solche hingegen, die sich inmitten eines dichten Gewebeverbands befinden, können den Primärtumor nicht

wenige Jahre vor der Diagnose ereignet, bei älteren hingegen manchmal schon Jahrzehnte zuvor. Was uns noch mehr überraschte: Bei neun von zehn Patienten hatte sich am Tag der Diagnose bereits mindestens eine metastasierende Zelllinie abgespalten. Häufig lag deren Ursprung sogar näher am Entstehungszeitpunkt des Primärtumors als am Sterbedatum des Patienten.

Wir hatten gehofft, Mutationen zu finden, die eine zentrale Rolle bei der Metastasierung spielen und brauchbare Ziele für Arzneistoffe abgeben könnten. Da jedoch die streuenden Zelllinien keine erkennbaren genetischen Besonderheiten aufwiesen, wandten wir uns der Evolution des Primärtumors zu. Insbesondere fragten wir uns, ob Mutationen in Zellen, die dem Stamm des phylogenetischen Baums nahestehen, die Funktion von Genen verändern, die für die Tumorentwicklung erwiesenermaßen wichtig sind.

Dies traf tatsächlich zu. Zum Beispiel erwies sich das gut untersuchte Tumorsuppressorgen *Tp53*, dessen Produkt die Zellteilung hemmt, bei vielen Patienten schon während der frühen Tumorevolution als verändert. Gleiches galt für das Proto-Onkogen *KRAS* (Proto-Onkogene werden durch Mutation zu Onkogenen, die die Zellteilung fördern). So trugen beinahe alle Pankreaskarzinompatienten in ihren entarteten Zellen eine frühe Mutation an Position 12 des *KRAS*-Gens.

Die Häufigkeit, mit der solche Veränderungen an Schlüsselgenen schon in einem zeitigen Stadium der Tumorevolution auftreten, legt nahe, dass sie maßgeblich wichtig sind sowohl für die Entstehung von Primärtumoren als auch von Metastasen. Wir vermuten daher: Wenn sich Mutationen ansammeln, welche die Tumorbildung vorantreiben, steigt auch die Wahrscheinlichkeit der Metastasenbildung – denn je größer die Zahl der Krebszellen, desto höher das Risiko, dass einige von ihnen sich an einem Ort im Gewebe finden und beziehungsweise eine epigenetische Veränderung erfahren, die eine Absiedelung ermöglichen.

Weitere Studien müssen klären, wie Modifikationen dieser Schlüsselgene den Fortschritt der Erkrankung beeinflussen. Doch schon jetzt ist klar, dass wir den frühen Treibermutationen besonders große Aufmerksamkeit schenken sollten. Medikamente, die an ihnen angreifen, könnten die Krebstherapie verbessern – und zwar sowohl während der frühen als auch späten Krankheitsstadien.

Aktuellen klinischen Studien zufolge lässt sich das körpereigene Abwehrsystem dahingehend ertüchtigen, dass es Tumorzellen gezielt zerstört. Dies geschieht bei so genannten Krebsimmuntherapien. Mediziner stehen hier allerdings manchmal vor dem Problem, dass die entarteten Zellen mit der Zeit unempfindlich gegenüber der Behandlung werden. Vermitteln spezifische Mutationen diese Resistenzbildung – oder ist sie eher eine Folge der Mikroumgebung und anderer Faktoren, wie es bei der Metastasierung der Fall zu sein scheint? Wir wissen es noch nicht, aber unsere Stammbäume könnten helfen, Antworten zu finden. Sie zeigen nämlich, dass einige weniger gut untersuchte Gene, denen eine Krebs fördernde Wirkung zugesprochen wird, in späteren Stadien der

Tumorevolution mutieren. Veränderungen dieser Erbanlagen erfolgen also, bildlich gesprochen, in den Ästen des Krebsstammbaums und sind mithin auch nur in einigen Metastasen beziehungsweise Regionen des Primärtumors präsent. Arzneistoffe, die sich gegen solche Mutationen richten, töten dementsprechend nicht den ganzen Krebsstammbaum ab, sondern nur einige Triebe, während die anderen weiterwuchern.

Zielt ein Wirkstoff andererseits auf eine Mutation, die sich während der frühen Tumorevolution ereignet und somit in beinahe allen entarteten Zellen vorliegt, könnte es zur Resistenzbildung kommen, wenn Zellen mit spezifischen neuen Mutationen entstehen. Tatsächlich haben die Pathologin Katerina Politi und ihre Kollegen von der Yale School of Medicine entdeckt, dass vergleichsweise späte Veränderungen des *EGFR*-Gens eine wesentliche Rolle für die Resistenzbildung gegen Krebsmedikamente spielen. *EGFR*, das einen Rezeptor des epidermalen Wachstumsfaktors kodiert, treibt in mutierter Form das Tumorstadium voran, vor allem bei Lungenkrebs. Mit den Methoden der Evolutionsbiologie möchten wir verstehen, weshalb und wie sich solche Resistenzen während der Therapie ausbilden. Wir berechnen dazu Tumorstammbäume der Patienten und suchen darin nach Mutationseignissen, die behandlungsunempfindliches Gewebe entstehen lassen. Vorläufige Auswertungen bestätigen, dass es von der Art der medizinischen Behandlung abhängt, welche Arzneistoffresistenz ein Tumor ausprägt.

Das Tumorleiden jedes einzelnen Patienten ist ein einzigartiger Fall

Die Zahl zielgerichteter Medikamente, die jeweils bestimmte Genmutationen angreifen, nimmt ständig zu. Auch können Mediziner die Chemo-, Strahlen- und Krebsimmuntherapie immer ausgetüftelter und wirksamer miteinander kombinieren. Onkologen behandeln die verschiedenen Krebsarten längst nicht mehr als einheitlich definierte Krankheitsbilder. Vielmehr begreifen sie das Tumorleiden jedes einzelnen Patienten als eigenständigen Fall. Die Untersuchung individueller Patientengenome wird sich künftig enorm auf die Krebsmedizin auswirken und ist überaus wichtig für eine personalisierte Medizin, wie sie vielen Ärzten, Patienten und Angehörigen vorschwebt. Um die neuen Diagnosemethoden sinnvoll einsetzen zu können, müssen Onkologen wie Evolutionsbiologen vorgehen. Sie müssen erfassen, wie sehr die entarteten Zellen eines Patienten genetisch variieren, und gestützt darauf angepasste Strategien entwickeln, um die Wurzel, den Stamm und die Äste der Krebserkrankung zu vernichten. ◀

QUELLEN

Hong, W. S., Shpak, M., Townsend, J. P.: Inferring the Origin of Metastases from Cancer Phylogenies. In: *Cancer Research* 75, S. 4021–4025, 2015

Turajlic, S., Swanton, C.: Metastasis as an Evolutionary Process. In: *Science* 352, S. 169–175, 2016

Zhao, Z. M. et al.: Early and Multiple Origins of Metastatic Lineages within Primary Tumors. In: *PNAS USA* 113, S. 2140–2145, 2016

GESCHLECHTERFORSCHUNG DIE LEGENDE VOM WEIBLICHEN GEHIRN

Männer und Frauen haben grundlegend verschiedene Gehirne? Falsch. Das Gehirn gleicht wohl eher einem bunten Mosaik aus männlichen und weiblichen Merkmalen.



Lydia Denworth ist Wissenschaftsjournalistin in New York.

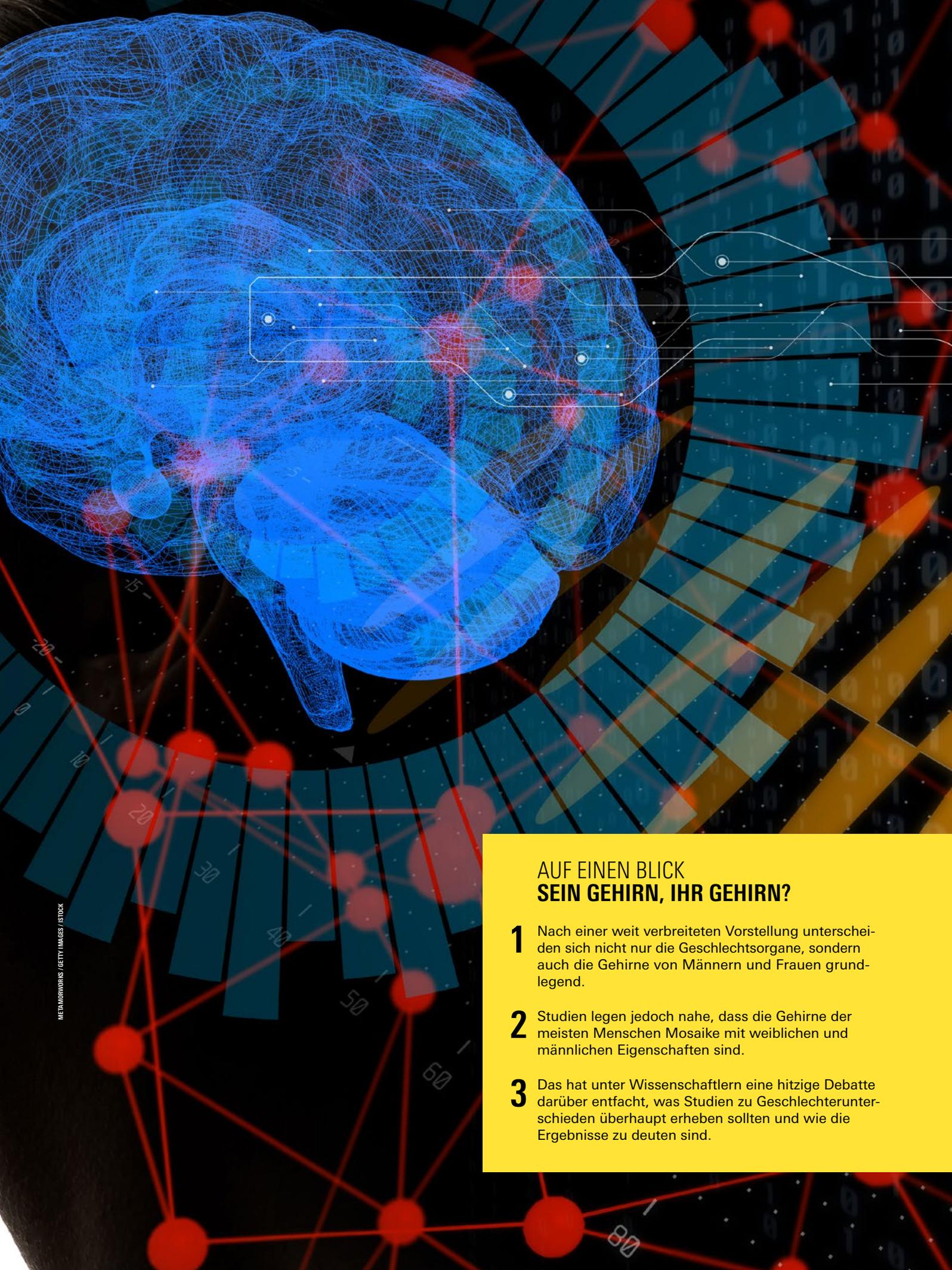
» [spektrum.de/artikel/1573438](https://www.spektrum.de/artikel/1573438)

Im Jahr 2009 beschloss die Neurowissenschaftlerin Daphna Joel von der Universität Tel Aviv, einen Kurs zum Thema »Gender-Psychologie« für ihre Studenten anzubieten. Als Feministin interessierte sie sich schon lange für die Unterschiede zwischen den Geschlechtern. Als Wissenschaftlerin jedoch hatte sie vorwiegend die neuronalen Ursachen von Zwangsstörungen erforscht. Um sich auf den Kurs vorzubereiten, sichtete sie die umfangreiche und ideologisch teils stark aufgeladene Literatur zu geschlechtsspezifischen Merkmalen im Gehirn. Die Themen waren bunt gemischt: Sie reichten von speziellen anatomischen Strukturen bei Ratten bis hin zu den möglichen Ursachen männlicher Aggression und weiblicher Empathie. Als sie mit ihren Vorbereitungen begann, glaubte Joel fest daran, dass sich Mann und Frau nicht nur in puncto Geschlechtsorgane und Körperstatur voneinander unterscheiden, sondern auch, dass ihre Gehirne verschieden ticken.

Während sie sich durch die Literatur wühlte, stieß sie jedoch auf eine Studie von 2001, deren Ergebnisse dieser Vorstellung widersprachen. Es ging um ein anatomisches Detail des Rattengehirns: winzige Fortsätze auf den Nervenzellen, so genannte dendritische Spines, die für die Übertragung elektrischer Signale wesentlich sind. Tracey Shors und ihr Team an der Rutgers University in New Jersey hatten sowohl bei weiblichen als auch bei männli-

chen Ratten künstlich den Östrogenspiegel erhöht. In der Folge bildete das weibliche Gehirn mehr dendritische Spines als das männliche. Wenn die Forscher die Tiere stressten, indem sie ihnen Stromschläge am Schwanz zufügten, drehte sich dieser Befund jedoch um: Die Männchen bildeten mehr Spines, während bei den Weibchen deren Zahl sogar abnahm.

Daphna Joel entwickelte daraufhin eine gewagte Hypothese. Weist jedes Gehirn ein buntes Mosaik aus sowohl männlichen als auch weiblichen Merkmalen auf, die sich je nach Situation verändern und anpassen? Schließlich gebe es auch kein typisch männliches und typisch weibli-



AUF EINEN BLICK SEIN GEHIRN, IHR GEHIRN?

- 1** Nach einer weit verbreiteten Vorstellung unterscheiden sich nicht nur die Geschlechtsorgane, sondern auch die Gehirne von Männern und Frauen grundlegend.
- 2** Studien legen jedoch nahe, dass die Gehirne der meisten Menschen Mosaik aus weiblichen und männlichen Eigenschaften sind.
- 3** Das hat unter Wissenschaftlern eine hitzige Debatte darüber entfacht, was Studien zu Geschlechterunterschieden überhaupt erheben sollten und wie die Ergebnisse zu deuten sind.

ches Verhalten, so ihre Argumentation. Einige Frauen können genauso aggressiv sein wie manche Männer, und von denen wiederum gibt es viele, die deutlich empathischer sind als die durchschnittliche Frau. Diese Frage brannte ihr so unter den Nägeln, dass Joel ab sofort begann, die einzelnen Elemente des Mosaiks zu erforschen.

Im Jahr 2015 analysierte sie gemeinsam mit Kollegen von der Universität Tel Aviv, vom Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig und von der Universität Zürich Hirnscans von mehr als 1400 Personen. Dabei interessierten sich die Forscher für zwei konkrete Fragen: Wie universell sind die Unterschiede zwischen männlichem und weiblichem Gehirn? Und ist das Gehirn überhaupt »in sich konsistent« – also sind alle seine Eigenschaften entweder durchweg »männlich« oder »weiblich«?

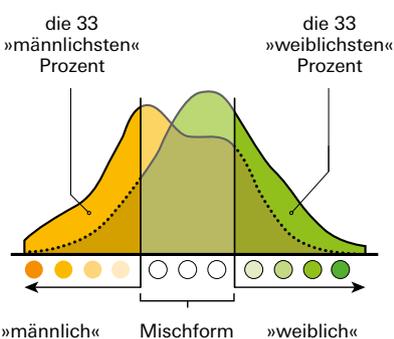
In den Daten ermittelte das Team um Daphna Joel die zehn Hirnregionen, die sich anatomisch und in ihrer Funktion am deutlichsten zwischen den Geschlechtern unterschieden. Zu den untersuchten Eigenschaften gehörte unter anderem das Gesamtvolumen der Zellkörper und ihrer dendritischen Ausläufer, der so genannten grauen Substanz, sowie das Gesamtvolumen der sie verbindenden Nervenfasern, also der weißen Substanz, die Kortexdicke und die Konnektivität zwischen Hirnregionen.

Anschließend sahen sich die Forscher die zehn Hirnareale bei jeder einzelnen Versuchsperson an und überprüften, ob sie eher die Eigenschaften des durchschnittlichen männlichen oder weiblichen Gehirns aufwies oder aber eine Mischform (siehe »Das Gehirn als Mosaik«, unten).

Wäre jedes Gehirn in sich konsistent, dürfte keines Merkmale von beiden Enden des »Männlichkeits-« und

Das Gehirn als Mosaik

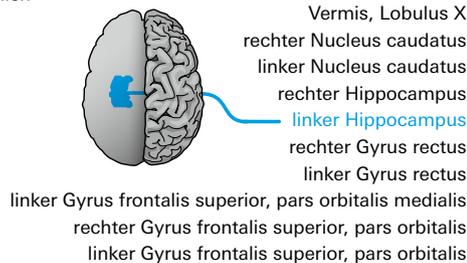
Die Entdeckung von Geschlechterunterschieden im menschlichen Gehirn führte zu der Annahme, dieses sei entweder »rein männlich« oder »rein weiblich«. Eine Studie von Daphna Joel und ihren Kollegen von der Universität Tel Aviv kommt jedoch zu einem anderen Ergebnis. Die Forscher analysierten Hirnscans von mehr als 1400 Probanden daraufhin, wie konsistent männlich beziehungsweise weiblich diese sind. Den



Verteilung der Teilnehmer mit »männlichem« oder »weiblichem« Hippocampus
(bezogen auf den Volumenanteil der grauen Substanz) in der Stichprobe

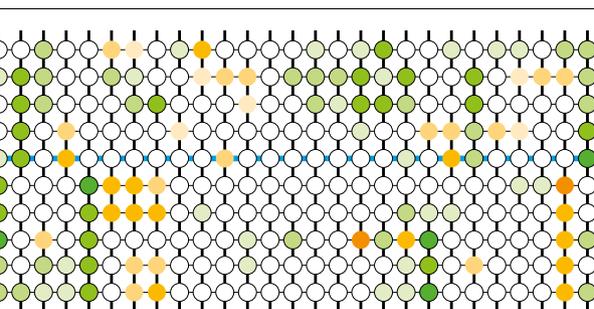
Wissenschaftlern zufolge würden in einem konsistent männlichen Gehirn alle Hirnareale ausschließlich »männliche« Eigenschaften haben, während es in einem inkonsistenten Gehirn sowohl »männliche« als auch »weibliche« Bereiche gäbe. Den Grad der »Männlichkeit« beziehungsweise »Weiblichkeit« einer Hirnregion machten die Forscher unter anderem an dem Volumenanteil an grauer Substanz fest. Zuvor hatten sie von 116 Hirnregionen diejenigen zehn ermittelt, in denen sich der Anteil der grauen Substanz zwischen Frauen und Männern im Durchschnitt am deutlichsten unterschied. In der Grafik unten stellen

Hirnregionen mit den deutlichsten Geschlechterunterschieden
(bezogen auf die graue Substanz)



die orangen Punkte je nach Intensität die eher »männlichen« Hirnregionen dar und die grünen Punkte die eher »weiblichen«. Mischformen sind in Weiß dargestellt. Rund ein Drittel der untersuchten Gehirne enthielt sowohl Areale mit einem typisch »männlichen« als auch solche mit einem typisch »weiblichen« Volumenanteil an grauer Substanz. Dagegen waren nur sehr wenige Gehirne ausschließlich »männlich« oder »weiblich«. Die anderen lagen irgendwo dazwischen, enthielten also vor allem Areale mit einem Anteil an grauer Substanz, der zwischen dem durchschnittlich männlichem beziehungsweise weiblichen lag.

Ergebnisse der Hirnscans
(jede Spalte steht für eine Person)



JEN CHRISTENSEN, NACH JOEL, D. ET AL.: SEX DIFFERENCES IN HUMAN BRAIN VOLUME. SCIENTIFIC AMERICAN, SEPTEMBER 2017

»Weiblichkeitsspektrums« aufweisen. Doch in Joels Studie waren das, je nach untersuchter Eigenschaft, zwischen 23 und 53 Prozent der Gehirne. Völlig konsistente Gehirne fanden die Wissenschaftler jedoch nur in null bis acht Prozent der Fälle. Die restlichen lagen irgendwo dazwischen, wiesen also vor allem Merkmale aus der Mitte des Spektrums auf.

»Unsere Gesellschaftsstruktur fußt auf der Annahme, die sichtbaren Geschlechtsmerkmale teilten die Menschheit in zwei Populationen, und zwar nicht nur, was das Kinderkriegen angeht, sondern auch in Bezug auf Gehirn und Verhalten«, erklärt Joel. »Viele glauben, diese Unterschiede seien zwangsläufig miteinander verbunden: Ist eine Person in Bezug auf ein Merkmal weiblich, so wird sie es wohl auch in anderer Hinsicht sein. Doch das ist ein Trugschluss!«

Heftige Kritik: »Ideologie als Wissenschaft«

Als ihr Studienbericht schließlich in einer Fachzeitschrift erschien, erhielt sie die unterschiedlichsten Reaktionen. Die Neurobiologin Gina Rippon von der Aston University in Birmingham (UK) etwa lobte ihre Erkenntnisse als wissenschaftlichen Durchbruch: »Ich hoffe, dass sich die Ausrichtung der Forschung im 21. Jahrhundert nun grundsätzlich ändern wird.«

Andere Forscher, die sich schon lange mit geschlechtsspezifischen Merkmalen beschäftigt hatten, widersprachen hingegen heftig. Sie kritisierten sowohl Joels Methodik als auch ihre Schlussfolgerungen und nicht zuletzt ihre unverhohlenen feministische Haltung. »Dieser Artikel verkauft Ideologie als Wissenschaft«, meint etwa der Neurobiologe Larry Cahill von der University of California in Irvine. Er hält Joels statistische Methoden für »manipuliert« – wenngleich nicht unbedingt bewusst. Andere Kritiker äußerten sich zurückhaltender. »Natürlich ist jedes Gehirn anders. Jedoch heißt das noch lange nicht, dass es keine Hirnregionen gibt, die sich im Mittel zwischen Frauen und Männern unterscheiden«, kommentierte die Neurowissenschaftlerin Margaret M. McCarthy, die an der University of Maryland Geschlechterunterschiede bei Ratten untersucht.

Joel bestreitet das nicht. Gene, Hormone und Umwelteinflüsse hinterließen in der Tat geschlechtsspezifische

Spuren im Gehirn. Es sei sogar möglich, allein auf Grund bestimmter Eigenschaften eines Gehirns zu wissen, welches Geschlecht sein Besitzer hat. Jedoch funktioniere das nicht umgekehrt: Eine Frau oder einen Mann anzusehen und zu wissen, wie sein Gehirn aufgebaut ist – das sei unmöglich.

So kontrovers Joels Studie auch diskutiert würde, die Quintessenz ihrer Aussage sei richtig, sagt dazu die Molekularbiologin Catherine Dulac von der Harvard University in Boston. Sie hatte nach Geschlechterunterschieden im Mäusegehirn gesucht und ist zu dem gleichen Ergebnis gekommen wie Joel: »Die Vielfaltigkeit zwischen den Individuen ist enorm.«

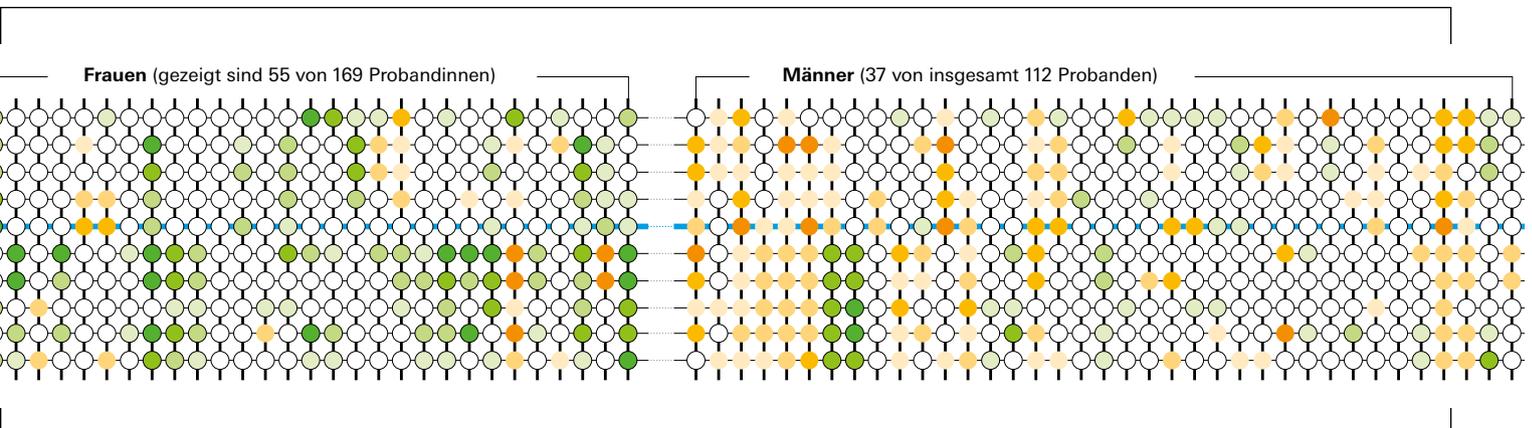
Im späten 19. Jahrhundert, lange vor der Erfindung der Kernspintomografie, war das wichtigste messbare Merkmal männlicher und weiblicher Gehirne ihr Gewicht (das freilich erst nach dem Tod bestimmt werden konnte). Da das Gehirn von Frauen im Durchschnitt 140 Gramm leichter ist als das von Männern, glaubten Wissenschaftler, Frauen müssten entsprechend weniger intelligent sein.

Eine der Ersten, die diese Vorstellung in Frage stellten, war die Frauenrechtlerin Helen Hamilton Gardener (1853–1925): Für die Intelligenz müsse vielmehr das Verhältnis von Hirnmasse zum Körpergewicht oder zur Körpergröße bedeutsam sein; nicht die Hirnmasse an sich. »Sonst würden Elefanten uns alle mit ihrer Denkfähigkeit weit in den Schatten stellen«, merkte sie an.

Gardener stellte ihr eigenes Gehirn nach ihrem Tod der Wissenschaft zur Verfügung. Zwar war es 140 Gramm leichter als das eines Durchschnittsmanns. Doch es wog beispielsweise genauso viel wie das Gehirn jenes Forschers, der die anatomische Sammlung an der Cornell University begründet hatte, wo Gardeners Gehirn seitdem aufbewahrt wird.

Fast das ganze folgende Jahrhundert war die Erforschung von Geschlechterunterschieden im Gehirn Domäne der Endokrinologen, die alle möglichen Hormone und deren Einfluss auf das Paarungsverhalten analysierten. Die Weiche, ob sich ein Embryo zu Männlein oder Weiblein entwickelt, wird schon bei der Befruchtung der Eizelle gestellt. Die alles entscheidende Frage lautet: Trägt das Spermium, das das Rennen macht, ein X- oder ein Y-Chromosom? Das Zusammenspiel verschiedener Gene bewirkt

JEN CHRISTENSEN NACH JOEL, D. ET AL.: SEX DIFFERENCES IN BRAIN STRUCTURE AND FUNCTION. SCIENTIFIC AMERICAN, SEPTEMBER 2017, S. 104-108-107-102, 2015, FIG. 17



dann, dass der Embryo entsprechend weibliche oder männliche Eigenschaften ausbildet.

Neben der körperlichen Entwicklung standen auch immer wieder psychologische und kognitive Aspekte im Fokus der Geschlechterforschung. Bei ihren Untersuchungen in den 1960er bis in die frühen 1980er Jahre fand die Psychologin Eleanor Maccoby von der Stanford University jedoch nur marginale Unterschiede: Mädchen waren im Durchschnitt sprachlich etwas gewandter, Jungen hatten dafür ein bisschen besseres räumliches Vorstellungsvermögen und waren den Mädchen in Mathe überlegen.

Wie zu erwarten, blieb diese Erkenntnis nicht unbestritten. Die Psychologin Janet Hyde von der University of Wisconsin-Madison etwa wertete 2016 die Ergebnisse älterer Studien zum Thema in einer Metaanalyse aus. Und siehe da: Gemittelt über die einzelnen Experimente waren Probandinnen in Mathematik genauso gut wie männliche Probanden. »Auch in Hinsicht auf viele psychologische Eigenschaften sind sich Männer und Frauen ziemlich ähnlich«, bemerkte Hyde, die daraufhin die »Hypothese der Geschlechterähnlichkeiten« formulierte. Demnach sind die Übereinstimmungen der psychologischen Profile von Männern und Frauen größer als die Unterschiede.

Erfahrungen beeinflussen geschlechtsspezifisches Verhalten stärker als angeborene Unterschiede

Sobald der technologische Fortschritt es ermöglichte, in das lebende Gehirn hineinzuschauen, trat jedoch eine lange Liste von geschlechtsspezifischen Merkmalen zu Tage, die nichts mit Paarung und Elternschaft zu tun hatten. Die Fachzeitschriften wurden geflutet von Studienberichten darüber, wie das Geschlecht zahlreiche Hirnfunktionen beeinflusst, darunter Emotionen, Gedächtnis, Sinneswahrnehmung und Orientierung.

Margaret M. McCarthy von der University of Maryland wählte Ratten als Versuchsobjekte für ihre Geschlechterforschung aus. Bei den Tieren untersucht sie diverse biologische Merkmale, von der Neuronengröße bis zur Anzahl der Astrozyten, welche die Neurone unter anderem mit Nährstoffen versorgen, und Mikrogliazellen, die Abfallstoffe und Zellreste entfernen.

»Es gibt eindeutige Belege für biologische Geschlechterunterschiede im Gehirn, und zwar nicht nur bei Labortieren, sondern auch bei Menschen«, sagt McCarthy. Doch bei Letzteren sind sowohl die Ursachen als auch die Auswirkungen komplexer. Denn anders als bei Tieren färben bei Menschen zudem psychologische und soziale Faktoren auf die Geschlechtsidentität ab.

»Die Tatsache, dass jemand als Mädchen oder Junge erzogen wird, hat biologische Auswirkungen auf das Gehirn«, betont McCarthy. Das sieht auch die Neurobiologin Lise Eliot von der Rosalind Franklin University of Medicine and Science so: Plastizität, also die Veränderung des Gehirns als Reaktion auf Erfahrungen, beeinflusst geschlechtsspezifische Verhaltensweisen stärker als angeborene biologische Unterschiede.

Die aktuell heftigsten Debatten provoziert die Frage, wie sich geschlechtsspezifische Eigenschaften des Gehirns auf das Verhalten auswirken. Eine der bekanntesten

Wenn wir nur die durchschnittlichen Unterschiede betrachten, übersehen wir etwas Wichtiges

Studien, die von Kritikern als »neurosexistisch« gebrandmarkt wurde, veröffentlichten Ruben und Raquel Gur mit ihren Teams von der University of Pennsylvania. Sie stellten mit Hilfe der so genannten Diffusions-Tensor-Bildgebung die Verläufe von Nervenfasern in den Gehirnen von fast 1000 Menschen im Alter von 8 bis 22 Jahren dar.

Dabei entdeckten sie, dass bei männlichen Probanden die Verbindungen innerhalb der einzelnen Hirnhälften stärker ausgeprägt sind, während Frauen eine robustere Vernetzung zwischen den beiden Hemisphären aufweisen. Die Vermutung der Forscher: Kurze Wege zwischen den Arealen innerhalb einer Hirnhälfte könnten es Männern erlauben, schnell und gezielt auf Wahrnehmungsreize zu reagieren. Die neuronale Verschaltung im weiblichen Gehirn wiederum begünstigt das Wechselspiel zwischen analytischem Denken und Intuition.

Mitten in diesen Meinungsstrudel geriet nun Daphna Joel. Viele ältere Studien hatten Unterschiede zwischen einzelnen Gehirnen identifiziert und daraus Hypothesen über die Gesamtheit aller Frauen und Männer abgeleitet. Joel und ihre Kollegen taten das Gegenteil: Sie suchten nach statistischen Differenzen in einer großen Stichprobe von Testpersonen und fragten sich, welche Schlüsse sich daraus für das einzelne Individuum ableiten lassen.

»Wir haben es mit unterschiedlichen Beschreibungen des gleichen Phänomens zu tun«, erläutert Joel. Doch welcher Ansatz wird dem menschlichen Gehirn besser gerecht? Der erste, in dem jeweils ein bestimmter Gehirntyp kennzeichnend für Männer oder Frauen ist, oder aber der zweite, der besagt, dass die meisten Gehirne Mosaik aus männlichen und weiblichen Eigenschaften sind?

Joel zieht gerne ein Beispiel aus dem Alltag heran: In den letzten Jahren wird wieder zunehmend über die Geschlechtertrennung im Schulunterricht diskutiert. »Diese fußt auf der Annahme, Jungen hätten einen festen Satz an Eigenschaften, zum Beispiel körperlich aktiver und ungeduldiger zu sein als Mädchen. Unsere Studie aber beweist, dass solche Annahmen vielleicht bezogen auf den Gruppendurchschnitt richtig sein mögen, nicht jedoch für jeden einzelnen Schüler«, sagt Joel. Deshalb mache es keinen Sinn, beispielsweise alle Jungen in eine Gruppe zu stecken, die besonders in Sport und Mathematik gefördert werde.

Die Diskussion über Joels Studie spitzt sich auf die Frage zu, was wesentlicher ist: der Durchschnitt einer untersuchten Population oder die Vielfalt der Individuen, aus der sie besteht? Wissenschaftler können aus ein und demselben Indiz unterschiedliche Schlüsse ziehen. »Das

menschliche Gehirn könnte durchaus ein Mosaik sein, jedoch eines mit vorhersagbaren Mustern«, schrieben Avram Holmes und seine Kollegen von der Yale University als Replik auf Joels Darlegungen im Jahr 2015. Sie sind der Meinung, dass diese Muster mit statistischen Methoden analysiert werden sollten.

Die emeritierte Biologieprofessorin Anne Fausto-Sterling von der Brown University in Providence ist überzeugte Kritikerin von verallgemeinernden Geschlechterstudien. »Wenn wir nur die durchschnittlichen Unterschiede betrachten, übersehen wir etwas Wichtiges«, meint sie. Schließlich sei das Gehirn kein einheitliches Gebilde, das sich entweder männlich oder weiblich verhält, noch dazu agiere es nicht in jedem Kontext gleichartig.

Die Auswirkungen dieser Kontroverse auf die Wissenschaft und besonders auf die klinische Forschung sind beträchtlich. Zwischen 1997 und 2000 wurden zehn Medikamente vom amerikanischen Markt genommen, da sie gefährliche Nebenwirkungen verursachten, die sogar tödlich sein konnten. Acht der zehn bargen größere Risiken für Frauen als für Männer.

Im Jahr 2013 halbierte die US-amerikanische Arzneimittelbehörde FDA die zugelassene Dosierung des Schlafmittels Zolpidem (Handelsname Ambien) für Frauen. Patientinnen hatten über Schläfrigkeit auf dem morgendlichen Weg zur Arbeit geklagt, und Forscher stellten daraufhin fest, dass sich das Medikament bei einigen Frauen noch nach dem Aufwachen im Körper nachweisen ließ.

Freilich gab es auch hier Einwände: Lise Eliot und die Wissenschaftshistorikerin Sarah Richardson von der Harvard University etwa gaben zu bedenken, die Nebenwirkungen von Zolpidem könnten schlicht auf das geringere Körpergewicht zurückzuführen sein. Aber das ist wohl nicht die alleinige Erklärung, denn der höhere Körperfettanteil bei Frauen sorgt dafür, dass bestimmte Medikamente langsamer abgebaut werden.

Schlägt das Pendel zu weit aus?

Das US-amerikanische Gesundheitsministerium reagierte auf diese Probleme und ordnete im Januar 2016 an, dass alle präklinischen Studien, in denen neue Medikamente zunächst noch bei Tieren geprüft werden, auch weibliche Tiere beteiligen müssen. Janine Clayton, Direktorin des Office of Research on Women's Health der National Institutes of Health, drückte sich eher vorsichtig aus, als sie die neuen Richtlinien erläuterte: Beide Geschlechter in die präklinischen Tests mit einzubeziehen, bedeute nicht zwangsläufig, dass man aktiv nach Unterschieden suche.

Viele erachten diese neue Direktive als wichtigen Schritt. Schließlich betreffen zahlreiche psychische und neurologische Erkrankungen, die erstmals in jungem Alter auftreten, häufiger Männer, darunter die Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung sowie Autismus-Spektrum-Störungen. Depressionen oder Angststörungen dagegen, die sich meist im späteren Lebensalter entwickeln, sind wiederum bei Frauen häufiger.

Doch Daphna Joel, Anne Fausto-Sterling und andere Wissenschaftler sind besorgt, das Pendel könne hier zu weit ausschlagen. Ihrer Auffassung nach sollten klinische

Studien zwar das Geschlecht als Variable berücksichtigen, also Männer und Frauen zu gleichen Teilen einschließen. Dennoch dürfe nicht aus dem Blick geraten, dass die Kategorien »männlich« und »weiblich« implizit Eigenschaften repräsentieren könnten, die mit dem biologischen Geschlecht nichts zu tun haben.

Wenn die Forschung dazu beitragen soll, das Denken über Geschlecht und Gender in der Gesellschaft zu verändern, könnte ein wichtiger erster Ansatz die Wortwahl betreffen. »Es ist an der Zeit, den Begriff des ›Dimorphismus‹ aufzugeben«, meint Lise Eliot. »Eierstock und Hoden sind dimorphe Strukturen. Ein um wenige Prozent abweichendes Verhältnis von weißer zu grauer Substanz ist nicht dimorph. Es handelt sich nur um ein Merkmal mit geschlechtsabhängiger Variabilität.«

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



KEEWEBBY / GETTY IMAGES / ISTOCK

Catherine Dulac fordert daher eine differenziertere Definition dieser Unterschiede. Bei Mäusen fand sie die Neuronenschaltkreise, die das männliche Paarungsverhalten steuern, auch im Gehirn weiblicher Tiere, während umgekehrt die Netzwerke für mütterliches Verhalten auch bei Männchen nachweisbar waren. »Daraus zu schließen, es gäbe keine Unterschiede zwischen männlichem und weiblichem Gehirn, wäre natürlich falsch«, sagt Dulac. »Die interessanten Fragen sind also: Wie kommen die Abweichungen zu Stande, und wie bedeutsam sind sie?«

McCarthy und Joel setzten sich Anfang 2017 zusammen und erarbeiteten eine Art Leitlinie dafür, was Studien zu Geschlechterunterschieden erheben sollten und wie die Ergebnisse zu deuten sind. Sie schlagen vor, folgende Fragen immer im Blick zu behalten: Tritt ein Merkmal dauerhaft auf oder nur vorübergehend? Hängt es von einem bestimmten Kontext ab? Kann es lediglich in zwei Varianten auftreten oder ein ganzes Spektrum von Ausprägungen annehmen? Resultiert es direkt oder indirekt aus dem Geschlecht seines Besitzers?

Diese Charakterisierung von Männlein und Weiblein ist bei Weitem nicht so griffig wie das Bild von Mars und Venus, doch vermutlich trifft sie die Realität besser. Denn in der Regel geben komplexe Bilder eher wieder, was den einzelnen Menschen wirklich ausmacht. ◀

QUELLEN

Joel, D. et al.: Sex Beyond the Genitalia: The Human Brain Mosaic. In: PNAS 112, S. 15468–15473, 2015

Joel, D., McCarthy, M.M.: Incorporating Sex as a Biological Variable in Neuropsychiatric Research: Where Are We Now and Where Should We Be? In: Neuropsychopharmacology 42, S. 379–385, 2017

1918

UNGESUNDES GELD

»Um [die Ansteckungsgefahr des Geldes] festzustellen, unternahm Dr. Piorkowski eingehende Untersuchungen, um über Menge und Art der Keime Aufschluss zu erlangen, die sich auf Papier und Nickelgeld vorfanden. Neben einer grossen Anzahl der sogenannten Colibakterien [und] harmlose[r] Bakterien wurden aber auch vereinzelt Diphteriebazillen festgestellt und häufiger Paratyphusbazillen. [Letztere] wirken gewöhnlich nur dann giftig, wenn sie in grossen Mengen in den Körper eindringen und wenn der Organismus nicht vollkommen intakt ist. Da unter den gegenwärtigen Ernährungsverhältnissen der Körper sehr leicht an Widerstandsfähigkeit einbüsst, muss die dem Geld anhaftende Ansteckungsmöglichkeit immerhin in Betracht gezogen werden, und man sollte stets darauf achten, nach dem Durchzählen einer größeren Geldmenge die Hände sofort gründlich zu reinigen.« *Gesundheit 16, S. 253*

GÜNSTIGE ENERGIEPROGNOSE

»Professor Halbfaß hat ermittelt, daß Deutschlands Wasserkräfte etwa 12 Millionen Pferdekräfte betragen. Allerdings ist nur ein Teil technisch verwertbar, da aber die Zahlen namentlich für Süddeutschland auf Mindestschätzungen beruhen und wohl die Hälfte der Wasserkräfte nutzbar gemacht werden kann, steht Deutschland auch in dieser Hinsicht sehr günstig da.« *Technische Monatshefte 8, S. 251*

ERDÖL-VINAIGRETTE

»Dr. E. Graefe [soll es] gelungen sein, das Petroleum kulinarischen Zwecken dienstbar zu machen, [nämlich] Paraffinöl- und Schmierölestillaten ihre unangenehmen Geschmacks- und Geruchseigenschaften vollkommen zu nehmen und alle schädlichen Bestandteile in einem Grade zu entfernen, daß ihr Genuß dem menschlichen Organismus weder Schaden noch Unannehmlichkeiten bereite. Daß Erdöl nährende Eigenschaften besitzt, kann keinem Zweifel unterliegen. Am ersten könnte dieses neue Erdölprodukt als Ersatz für Salatöl in Frage kommen.« *Die Umschau 36, S. 441*

1968

KUBISTISCHE MIKROSTRUKTUREN

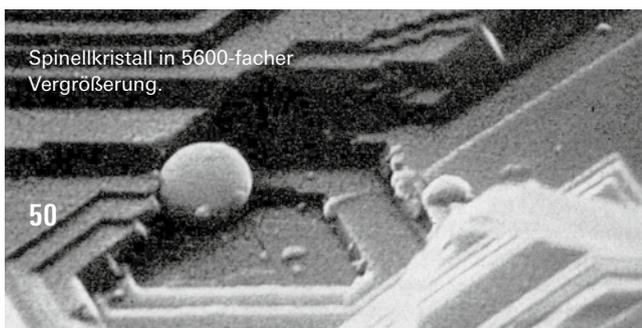
»Oberflächen-Aufnahmen, die mit dem Raster-Elektronenmikroskop gewonnen werden, [zeichnen sich] durch eine ungewöhnliche Plastik aus. Das Durchstrahlungsmikroskop ist in seiner jüngsten Entwicklung bis in das Gebiet der Kristallgitter vorgedrungen. Die Spitze hinsichtlich der Auflösung bildet das Feldelektronen- bzw. Feldionen-Mikroskop, mit dem einzelne Moleküle und Atome bildmäÙig dargestellt werden können. [Jahrzehntelang] war die Voraussetzung eines feinen Abtaststrahls und des notwendigen Elektronikteils zur Aufnahme der Elektronenimpulse und ihrer Wiederzusammensetzung zum Elektronenbild noch nicht gegeben. Inzwischen ist beides erreicht. Bei dem am höchsten vergrößerten Bild (Abbildung) ist man an der Grenze der förderlichen Vergrößerung angelangt. Die Auflösung, die wir mit dem Gerät erzielen, liegt bei etwa 250 Å.« *Die Umschau 16, S. 497*

STRESS SCHÜTZT VOR STRAHLUNG?

»Um Zusammenhänge zwischen Streß und Altern zu untersuchen, führte eine Forschergruppe am Cleveland Psychiatric Institute, Cleveland, Ohio, Experimente mit Mäusen durch. Grundsätzlich wurde dabei die Wirkung von Temperaturveränderungen und elektrischen Schocks (Streß-Erreger) auf eine Gruppe von Mäusen beobachtet und mit einer Anzahl von Tieren verglichen, die vor der Streß-Behandlung beziehungsweise ohne diese [ionisierender Strahlung ausgesetzt] worden waren. Die Strahlung verkürzte die Lebenserwartung bei sämtlichen Versuchstieren; aber ihre Wirkung war weit geringer bei streßbelasteten Mäusen. Gegenwärtig sind diese Ergebnisse noch völlig unerklärbar.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 8, S. 297–299*

LSD BRINGT NERVEN DURCHEINANDER

»Mit einer Mikromethode wurde die Basen-Zusammensetzung [der] RNS aus bestimmten Regionen des Kaninchen-Großhirns nach chronischer Gabe von LSD analysiert. Bereits nach vier Tage lang wiederholter Gabe von 150 mg/kg, zweimal täglich kommt es zu einer Vermehrung der Base Cytosin und einer Abnahme von Guanin. Vergleichende Versuche mit einer anderen Lysergsäureverbindung, die keine Halluzinationen erzeugt, ergaben keine derartigen RNS-Veränderungen. Dadurch ist erstmals nachgewiesen, daß die Gabe eines Psychopharmakons in nicht toxischen Dosen Veränderungen im Chemismus von Nervenzellen verursachen kann.« *Die Umschau 17, S. 536*



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)



DOUGLAS/GETTY IMAGES/ISTOCK



PRÄHISTORIE ZANKAPFEL PALÄO-DNA

Genomanalysen revolutionieren die Forschung zur Frühgeschichte des Menschen. Gleichzeitig entfachen sie Konflikte zwischen Archäologen und Genetikern.

Ewen Callaway ist Mikrobiologe. Er arbeitete als freier Wissenschaftsjournalist in den USA und ist seit 2010 Redakteur bei »Nature« in London.



► spektrum.de/artikel/1573446

► Mitten in der Hügellandschaft von Wiltshire im Südwesten Englands liegt eine der größten Megalithanlagen der Jungsteinzeit, der West Kennet Long Barrow. Dieser von mächtigen Steinplatten bedeckte Grabhügel wurde etwa 3600 v. Chr. errichtet. Zunächst diente seine fünf Kammern wohl als Grab für rund drei Dutzend Männer, Frauen und Kinder. Aber selbst mehr als 1000 Jahre später brachten die Menschen noch Töpferwaren und Perlen dorthin – Reliquien und Huldigungen an Vorfahren und Götter, so interpretieren Forscher den Befund.

Die Artefakte demonstrieren überraschend weitläufige Verbindungen mit dem Kontinent. Das Auftreten der auf Grund ihrer Form als Glockenbecher bezeichneten Gefäße

Knapp 30 Kilometer nördlich von Stonehenge erhebt sich das Hügelgrab West Kennet Long Barrow: eine heilige Stätte für gut 1000 Jahre, die laut DNA-Analysen von unterschiedlichen Ethnien aufgesucht wurde.

belegt, dass neue Ideen die Britischen Inseln erreichten und allmählich eine stabile Kultur mit jahrhundertalten Traditionen veränderten.

Seit 2017 kursieren allerdings mehr und mehr Berichte, die dieses bisherige Bild in Frage stellen. So werteten Forscher Genomdaten von 170 Menschen aus dem europäischen Raum der damaligen Zeit aus, darunter 100, bei denen auch Glockenbecher-Artefakte gefunden wurden. Sie erkannten, dass die Bevölkerungsgruppe, die das Hügelgrab gebaut und ihre Toten dort begraben hatte, bis 2000 v. Chr. nahezu verschwunden war. Die Neuankömmlinge aber scheinen viele Traditionen ihrer Vorgänger fortgeführt zu haben. »Das passt nicht zusammen«, wundert sich der Archäologe Neil Carlin vom University College Dublin, der die Übergangsperiode von der Jungsteinzeit ins Kupfer- und Bronzezeitalter Irlands und Großbritanniens erforscht.



AUF EINEN BLICK ALTE GENE, NEUE PERSPEKTIVE

- 1** In den Altertumswissenschaften bahnt sich durch die Paläogenetik ein ähnlicher Umbruch an, wie ihn die Radiokarbondatierung in den 1970er Jahren bewirkte.
- 2** Anhand von DNA-Proben lassen sich Menschengruppen unterscheiden, die bisher nur durch ihre materiellen Hinterlassenschaften zu fassen sind.
- 3** Manche Archäologen warnen, dass Kulturentwicklung und Migration in einem komplexeren Zusammenhang stehen können, als es die Genetik wiedergibt.

Anfang 2018 erregte dann eine Veröffentlichung in »Nature« die Experten der Glockenbecherkultur: Die Studie beschrieb 230 weitere Genproben, was sie zur bisher umfangreichsten paläogenetischen Analyse machte. Dabei steht sie nur beispielhaft für einen neuen Forschungsansatz, der das Feld gründlich durcheinanderrüttelt. Schon 2010 hatten Wissenschaftler das erste vollständige Genom eines Menschen aus prähistorischer Zeit sequenziert. Seitdem sammeln sie Daten von mehr als 1300 Individuen und beleuchten damit aus genetischer Sicht Themen wie die Entwicklung der Landwirtschaft, die Verbreitung der Sprachen und der Stilwandel bei Töpferwaren – alles Fragen, die klassische Archäologen seit Jahrzehnten beschäftigen.

Einige sind begeistert: Das Studium alter DNA bringt frischen Wind und neue Spannung in die Archäologie und erschließt früher undenkbar Informationen etwa über die Verwandtschaftsbeziehungen der Toten eines bestimmten Friedhofs. Andere Wissenschaftler geben sich zurückhaltender. »Die eine Hälfte der Archäologen sieht alte DNA als Lösung aller Probleme. Für die andere Hälfte ist sie ein Werk des Teufels«, scherzt der Ur- und Frühgeschichtler Philipp Stockhammer von der Ludwig-Maximilians-Universität in München – wo er mit Genetikern und Molekularbiologen an einem Institut zusammenarbeitet, das vor einigen Jahren gegründet wurde, um Brücken zwischen den Fachgebieten zu bauen. Die neue Technologie sei keine Wunderwaffe, fasst er zusammen – wer sie aber als Archäologie ignoriert, dürfte sich selbst schaden.

Einige seiner Kollegen beklagen, der molekulare Ansatz verwische die Vielschichtigkeit des Forschungsfelds und fördere ungerechtfertigte oder sogar gefährliche Annahmen über den Zusammenhang von Biologie und Kultur.

Es ist nicht das erste Mal, dass eine neue Technologie seine Zukunft umtreibt. Bevor die Radiokarbondatierung in den 1940er und 1950er Jahren von Chemikern und Physikern entwickelt wurde, hatten Prähistoriker das Alter von Fundstätten anhand relativer Chronologien bestimmt: Sie identifizierten vor allem Keramikstile und deren zeitliche Abfolge; Bezugnahmen auf das alte Ägypten ermöglichten dann eine zeitliche Verankerung anhand der ägyptischen

Chronologie. Dabei gingen auch Annahmen über die Ausbreitung von Ideen aus dem Nahen Osten in die Datierung ein. »In unseren Lehrbüchern steht vieles zur Vorgeschichte, was nicht ganz passt oder zum Teil sogar schlichtweg falsch ist«, argwöhnte 1973 der britische Prähistoriker Colin Renfrew.

Das Umdenken wurde damals erschwert, weil die ersten Radiokarbondatierungen hunderte Jahre oder mehr danebenlagen. Inzwischen ist die Methode sehr verlässlich, so dass Archäologen nun weniger Zeit für die Altersbestimmung von Knochen und Artefakten und mehr für deren Deutung aufbringen können, erklärt der Bronzezeit-spezialist Kristian Kristiansen von der Universität von Göteborg in Schweden. »Wir konnten uns endlich mehr darauf konzentrieren, wie prähistorische Gruppen organisiert waren.« Die Analyse alter DNA biete nun ähnliche Chancen, meint Kristiansen, einer der größten Verfechter dieser Technologie.

Und tatsächlich haben Genetiker und Archäologen nun schon 30 Jahre lang im gleichen Feld geforscht – wenn auch mehr neben- als miteinander. 1985 wurde erstmals die DNA einer ägyptischen Mumie untersucht, wobei man heute allerdings vermutet, dass die damals entnommene Gewebeprobe kontaminiert war. Seit die Sequenziermethoden vor wenigen Jahren wesentlich verbessert wurden, sind die beiden Forschungsansätze allerdings auf Kollisionskurs.

Heikles Thema für Archäologen: Migration

Im Jahr 2010 analysierten Wissenschaftler unter der Leitung von Eske Willerslev vom Naturhistorischen Museum Dänemark »ancient DNA« (aDNA oder Paläo-DNA) aus einer Haarsträhne eines 4000 Jahre alten Grönländers und veröffentlichten sie als erste vollständige Sequenz eines alten menschlichen Genoms. Kristiansen bat den Kollegen daraufhin, mit ihm die Ausbreitung der Menschen vor etwa 4000 bis 5000 Jahren zu erforschen, also zu einer Zeit, als das späte Neolithikum der Bronzezeit wich.

Migration in der Prähistorie ist für Archäologen schon länger ein konfliktträchtiges Thema: Waren eingewanderte Bevölkerungsgruppen für kulturelle Veränderungen wie dem Aufkommen des Glockenbeckers verantwortlich, oder wurden vielmehr die Ideen dazu im kulturellen Austausch weitergegeben? Bevölkerungsgruppen anhand zugeordneter Artefakte zu identifizieren, galt immer mehr als Relikt einer kolonialen Vergangenheit mit entsprechenden Denkmustern. »Töpfe sind Töpfe, keine Menschen«, lautet ein gängiger Spruch.

Die meisten Archäologen sind inzwischen auch davon abgekommen, die Menschen der Vorgeschichte als homogene kulturelle Einheiten zu betrachten, welche die Welt eroberten. Die Auswertung alter DNA hat nun aber darüber hinaus schon einige Male den Nachweis erbracht, dass sich wie beim West Kennet Long Barrow die heute in einer Region ansässigen Menschen genetisch von früheren Siedlern unterschieden.

Womöglich lassen sich prähistorische Migrationen nun doch nachweisen. »Die Genetik ist besonders gut dafür geeignet, Veränderungen in der Bevölkerung zu erken-

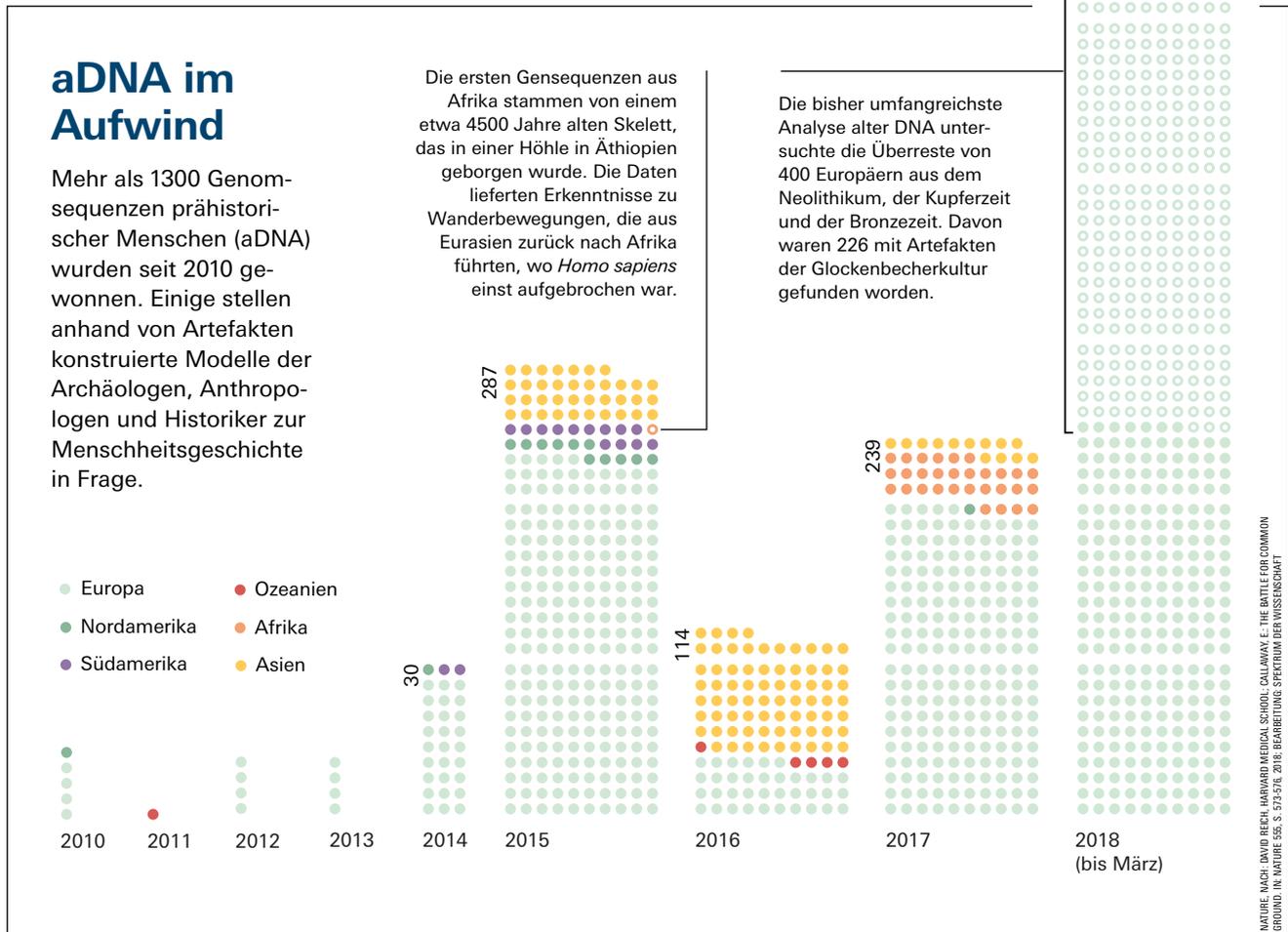
nen«, fasst es der Populationsgenetiker David Reich von der Harvard Medical School in Boston (US-Bundesstaat Massachusetts) zusammen. Die Archäologen »waren immer bereit zu akzeptieren, dass Einzelpersonen auswanderten. Aber auf größere Wanderströme gerade in der Bronzezeit waren sie nicht vorbereitet«, erzählt Kristiansen.

Dabei konnten Forscher schon nachweisen, dass manche Individuen jener Zeit im Lauf ihres Lebens Hunderte von Kilometern zurücklegten. Das verraten die Strontiumisotope in ihren Zähnen, weil deren Anteile von der Geochemie am Ort der Kindheit bestimmt werden. Sollte es nicht möglich sein, so überlegten Kristiansen und Willerslev, mittels DNA-Analyse die Ausbreitung ganzer Populationen nachzuzeichnen?

Das plant auch der Archäologe David Anthony vom Hartwick College in Oneonta in New York. 2007 hatte er die Hypothese aufgestellt, dass die eurasische Steppe die Pferdezucht und den Transport auf Rädern katalysiert habe, was die Verbreitung der indoeuropäischen Sprachfamilie in Europa und Teilen Asiens vorantrieb. 2012 belud er sein Auto mit Kisten voll menschlicher Überreste, die er mit Kollegen in den Steppen nahe der russischen Stadt Samara ausgegraben hatte. Einige Knochen konnten der bronzezeitlichen Jamnaja-Hirtenkultur zugeordnet werden. Er brachte sie nach Boston in Reichs Labor zur Analyse alter DNA.

Drei Jahre später veröffentlichten die Forscher ihre Ergebnisse in »Nature«; zeitgleich erschien das Paper eines konkurrierenden Teams mit weitgehend ähnlichen Ergebnissen. Demnach hatte ein Zustrom von Hirten aus den Graslandsteppen des heutigen Russlands und der Ukraine, die mit Funden der Jamnaja-Kultur und ihren typischen Kurgan-Hügelgräbern in Zusammenhang gebracht werden, vor etwa 4500 bis 5000 Jahren einen Großteil des Genpools in Mittel- und Westeuropa ersetzt. Zeitlich fiel dies insbesondere mit dem Verschwinden neolithischer Keramik und bestimmter Bestattungsweisen zusammen sowie mit dem Neuauftreten der in Nord- und Mitteleuropa verbreiteten Schnurkeramik.

»Das war ein Schock für Archäologen«, erinnert sich Kristiansen, und Reich zufolge regte sich schon vor der Veröffentlichung Widerstand. Als er einen Entwurf unter seinen Mitarbeitern verbreitete, zogen sich mehrere Archäologen aus dem Projekt zurück. Die postulierte Verdrängung neolithischer Gruppen in Westeuropa durch Einwanderer erinnerte zu stark an die Ideen von Gustaf Kossinna. Der deutsche Archäologe des frühen 20. Jahrhunderts hatte als Pionier der Sied-



lungsarchäologie eine direkte Linie von Schnurkeramikern zu Germanen und dem deutschen Volk der Neuzeit gezogen. Diese Ideen flossen dann in die nationalsozialistische Ideologie ein.

Reich konnte seine Koautoren zurückgewinnen, indem er dergleichen in einem Aufsatz ausdrücklich zurückwies, der dann im 141-seitigen Ergänzungsmaterial von »Nature« veröffentlicht wurde. Das beruhigte aber längst nicht jeden. In einer »Kossinas Lachen« betitelten Replik widersprach der Archäologe Volker Heyd von der University of Bristol zwar nicht der Annahme, Menschen aus der Steppe seien nach Westen gezogen. Die Art und Weise, in der die genetische Signatur der Menschen mit komplexen kulturellen Ausdrucksformen zusammengerührt wurde, lehnte er aber ab. Schnurkeramik und Jamnaja-Bestattungen hätten mehr Unterschiede als Gemeinsamkeiten. Zudem gäbe es etliche Beweise für einen kulturellen Austausch, zumindest zwischen der russischen Steppe und den Regionen in ihrem Westen, noch vor der Zeit der Jamnaja-Kultur. Das widerlege zwar nicht die Schlussfolgerungen der Genetiker, »aber sie spiegeln die Komplexität der Vergangenheit nicht wider«. Und er rief seine Kollegen dazu auf, Genetikern nicht »die Tagesordnung und die Botschaften zu überlassen«, sondern »ihnen etwas über die Komplexität menschlichen Handelns in unserer Vergangenheit« beizubringen.

Ähnliche Begriffe, verschiedene Konzepte

Die Molekularanthropologin Ann Horsburgh von der Southern Methodist University in Dallas führt solche Spannungen auf Kommunikationsprobleme zurück. Prähistoriker und Genetiker sagten unterschiedliche Dinge über die Vergangenheit aus, verwendeten dabei aber oft ähnliche Begriffe. Während Erstere mit dem Namen einer Kultur deren materielle Hinterlassenschaften meinen, bezeichnen die zweiten damit eine anhand von DNA identifizierbare Menschen-Gruppe. Horsburgh bemängelt zudem, dass genetische Daten allzu oft Vorrang vor den Ergebnissen und Rückschlüssen der Archäologen und Anthropologen erhielten. Ein solcher »molekularer Chauvinismus« verhindert ihres Erachtens eine sinnvolle Zusammenarbeit. »Man hat fast den Eindruck, genetische Daten könnten irgendwie eine ultimative Wahrheit über das Universum verbreiten, nur weil sie von Leuten in Laborkitteln generiert werden.« Auch sie fordert ihre Kollegen auf, aktiv zu werden. Schließlich sind es die Archäologen, die das Material für die aDNA-Analysen ausgraben und den Genetikern zur Verfügung stellen. Also sollten sie ihre Macht besser nutzen und eine gerechtere Partnerschaft einfordern.

Viele Archäologen setzen sich zudem mit den ihnen nicht genehmen Analysedaten intensiv auseinander. Neil Carlin zum Beispiel regte die Studie, der zufolge das Auftreten der Glockenbecherkultur in England mit dem Austausch von mehr als 90 Prozent des britischen Genpools zusammenfiel, zu grundsätzlichen Überlegungen an.

Wie Heyd akzeptiert er Brüche in den Abstammungslinien – auch wenn über die zeitliche Einordnung und das Ausmaß zu diskutieren sei. Doch warum blieben kulturelle Praktiken wie die Beigabe von Töpferwaren und anderen Objekten bei den Bestattungen im West Kennet Long Barrow angesichts derart drastischer Veränderungen überhaupt bestehen?

»Viele Genetiker veröffentlichen Listen von Daten, verfolgen Gensignaturen über geografische Räume hinweg, erforschen aber nicht das Wie oder Warum.« Die unterschiedlichen Betrachtungsweisen beunruhigen ihn allerdings nicht mehr. »Ich versöhne mich zunehmend mit der Vorstellung, dass Archäologie und alte DNA unterschiedliche Geschichten erzählen.« Die Veränderungen in den kulturellen und sozialen Praktiken, die er selbst unter-

Die typischen Tongefäße der Glockenbecherkultur finden sich in der Übergangszeit zwischen Neolithikum und Bronzezeit in vielen Regionen Europas. Offenbar waren die Träger der Kultur aber nicht immer miteinander verwandt: Gelegentlich wanderten Töpfe und Moden, nicht jedoch ihre Schöpfer.



JGALINDO / GETTY IMAGES / ISTOCK
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

sucht, könnten durchaus gleichzeitig mit den Bevölkerungsverschiebungen aufgetreten sein, die Reich und sein Team gerade aufdecken – sie müssen es aber nicht unbedingt. Der Einblick in die Genetik wird nie die ganze Erlebniswelt von Menschen wirklich abbilden, die in archäologischen Relikten steckt.

Reich stimmt zu, dass sich sein Forschungsfeld noch in der Phase des Datensammelns und Sortierens befindet und die Genetik nur die groben Konturen der Vergangenheit skizzieren kann. Umfassende Schlussfolgerungen, wie sie in den Veröffentlichungen zur Steppenwanderung aus dem Jahr 2015 enthalten sind, werden vermutlich detaillierteren, regional fokussierten Studien weichen.

Ausbreitung der Keramiköpfe

Dies zeigt sich schon jetzt. So hielt die Glockenbecherstudie zwar tief greifende Veränderungen im prähistorischen Genpool auf den Britischen Inseln fest – zeigte aber ebenso, dass das kulturelle Phänomen nicht etwa von einer einzigen Gruppe von Personen getragen wurde. So hatten Forscher etwa in Iberien ebenfalls Beigaben und DNA-Spuren aus der Glockenbecherperiode untersucht. Demnach waren die Menschen dort eng mit den lokalen Bevölkerungen früherer Zeiten verwandt – nicht aber mit den nordeuropäischen Gruppen. Offenbar wanderten in diesem Fall die Töpfe beziehungsweise die Idee, nicht aber die Menschen selbst.

Im thüringischen Jena ist mittlerweile ein Knotenpunkt zwischen Archäologie und Genetik entstanden: Dort gründete die Max-Planck-Gesellschaft 2014 das Institut für Menschheitsgeschichte unter der Leitung des aDNA-Experten Johannes Krause. Im Team des Genetikers Svante Pääbo hatte er am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig am Neandertalergenom geforscht und bei der Entdeckung des Denisova-Menschen mitgewirkt.

Sein Interesse gilt nun nicht mehr vornehmlich unseren frühen Vorfahren. Schon bevor er die Leitung des Jenaer Instituts übernahm, beschäftigte sich sein Team mit der Identifikation der DNA Pest auslösender Bakterien in Zähnen aus dem 14. Jahrhundert. Seine Daten gelten als erster direkter Hinweis auf eine mögliche Ursache der Pandemie. In Jena hofft Krause nun, die Genetik nicht nur auf prähistorische Perioden wie das Neolithikum und die Bronzezeit anwenden zu können, wo archäologische Methoden das Hauptinstrument für die Rekonstruktion der Vergangenheit sind; stattdessen möchte er damit auch Überreste neuerer Zeiten untersuchen. Derzeit sucht er noch Kontakt zu Historikern, aber Archäologie und Genetik sind am Institut schon fest verankert – seine Abteilung trägt dementsprechend den Zusatz Archäogenetik. »Wir müssen interdisziplinär arbeiten«, sagt er, weil sich die Genetiker zunehmend Fragen und Zeiträumen zuwenden, die in den letzten Jahrzehnten eher von Archäologen, Linguisten und Historikern besetzt waren.

Krauses Team hat bei Projekten zur paläogenetischen Datenerfassung auch häufig mit Reich kooperiert. So erschien 2017 eine Studie, die den Übergang zwischen

Neolithikum und Bronzezeit in Deutschland in den Blick nahm. Die Veröffentlichung gefiel sogar jenen Archäologen, die sonst eher Zweifel an groß angelegten DNA-Studien anmelden.

Unter der Leitung von Stockhammer, der gleichzeitig am Jenaer Institut tätig ist, waren 84 neolithische und bronzezeitliche Skelette aus dem südbayerischen Lechtal aus der Zeit zwischen 2500 und 1700 v. Chr. unter die Lupe genommen worden. Die Diversität der mitochondrialen Genome, die immer mütterlicherseits vererbt werden, nahm in dieser Zeit stark zu, was auf einen Zustrom von Frauen schließen ließ. Die Analyse der Strontiumisotope in den Zähnen bestätigte inzwischen, dass die Frauen größtenteils nicht aus der Gegend stammten. Dabei gab es auch einen Fund, bei dem zwei genetisch verwandte Menschen, die nur wenige Generationen trennten, mit Beigaben aus unterschiedlichen Kulturen begraben worden waren. Mit anderen Worten: So manche kulturelle Verschiebung in den archäologischen Funden könnte sich auch durch das Einwandern einzelner Personen erklären lassen, ohne die Annahme einer Massenmigration.

Laut Stockhammer wird man schon bald in der Lage sein, alle Genome einer Grabstätte zu sequenzieren, um mit den Daten lokale Stammbäume zu erstellen, gleichzeitig die Individuen aber auch in größere Abstammungsmuster einzuordnen. Anhand dieser Daten ließe sich auch untersuchen, wie biologische Verwandtschaft, die Vererbung materieller Kultur und sozialer Status miteinander verknüpft sind. »Das sind die großen Fragen der Geschichte. Wir können sie nur gemeinsam lösen!«

Weitere Daten hierzu lassen sich seit Februar 2018 auf dem bioRxiv-Preprint-Server finden. Der dort eingestellte Artikel untersucht die Zeit der Völkerwanderung in Europa, als »Barbarenhorden« die Lücke füllten, die nach dem Fall des Römischen Reichs entstanden war. Ein Team von Genetikern, Archäologen und Historikern hatte Stammbäume von 63 Personen erstellt, deren Überreste von zwei mittelalterlichen Friedhöfen in Ungarn und Norditalien stammten, die den Langobarden zugeordnet wurden. Die Forscher fanden Hinweise darauf, dass hochrangige Nichtlangobarden ebenfalls auf diesen Friedhöfen begraben waren. Genetisch stammten die meisten aus Zentral- und Nordeuropa und unterschieden sich von Einheimischen, die eher ohne Güter beigetragen wurden. Dies könnte vielleicht die Idee stützen, dass es in Barbarengruppen auch Fremde gab.

Patrick Geary, Mediävist am Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) und Mitarbeiter bei der Langobardenstudie warnt aber, Bezeichnungen wie Franken, Goten oder Wikinger durch genetische Profile konkretisieren zu wollen, ohne zu wissen, wie sich diese Völker selbst sahen. »Heutzutage interessieren sich Historiker viel für Identitäten«, sagt er. »Die Genetik kann diese Fragen aber nicht beantworten.« ◀

nature

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 555, S. 573–576, 30. März 2018

ASTROGEOLOGIE STREIT UM DIE FRÜHE ERDE

**Wann entstand das jetzige Leben auf der Erde?
Nicht vor dem »Großen Bombardement«, einem heftigen
Asteroidensturm vor knapp vier Milliarden Jahren –
so das Lehrbuchwissen. Doch es mehren sich Zweifel.**

► Etwa eine halbe Milliarde Jahre nach der Entstehung der Erde brach in unserem Sonnensystem die Hölle los. Ein Hagel an Asteroiden, manche davon so groß wie ganze Städte, traf unseren Planeten mit einer Wucht, die große Teile der Erdkruste zum Schmelzen brachte. Das Inferno ließ vor vier Milliarden Jahren fast alles Wasser verdampfen und sterilisierte die Oberfläche des Planeten – sollte es zu jener Zeit bereits Leben gegeben haben, wurde

es nun ausgelöscht. Erst als die Einschläge aus dem All abebbten, konnten einzellige Organismen dauerhaft Fuß fassen und zum Ursprung aller späteren Lebensformen auf der Erde werden.

Dieses höllische Szenario, bekannt als »Großes Bombardement«, ist fester Bestandteil der frühen Geschichte der Erde, seit Geologen das Mondgestein untersuchten, das die Astronauten der US-amerikanischen Apollo-Missi-

LINDA KASIAN



Adam Mann ist Wissenschaftsjournalist in Oakland, Kalifornien.

► [spektrum.de/artikel/1573454](https://www.spektrum.de/artikel/1573454)

SERIE

Die junge Erde

Teil 1: **August 2018**
Streit um die frühe Erde
Adam Mann

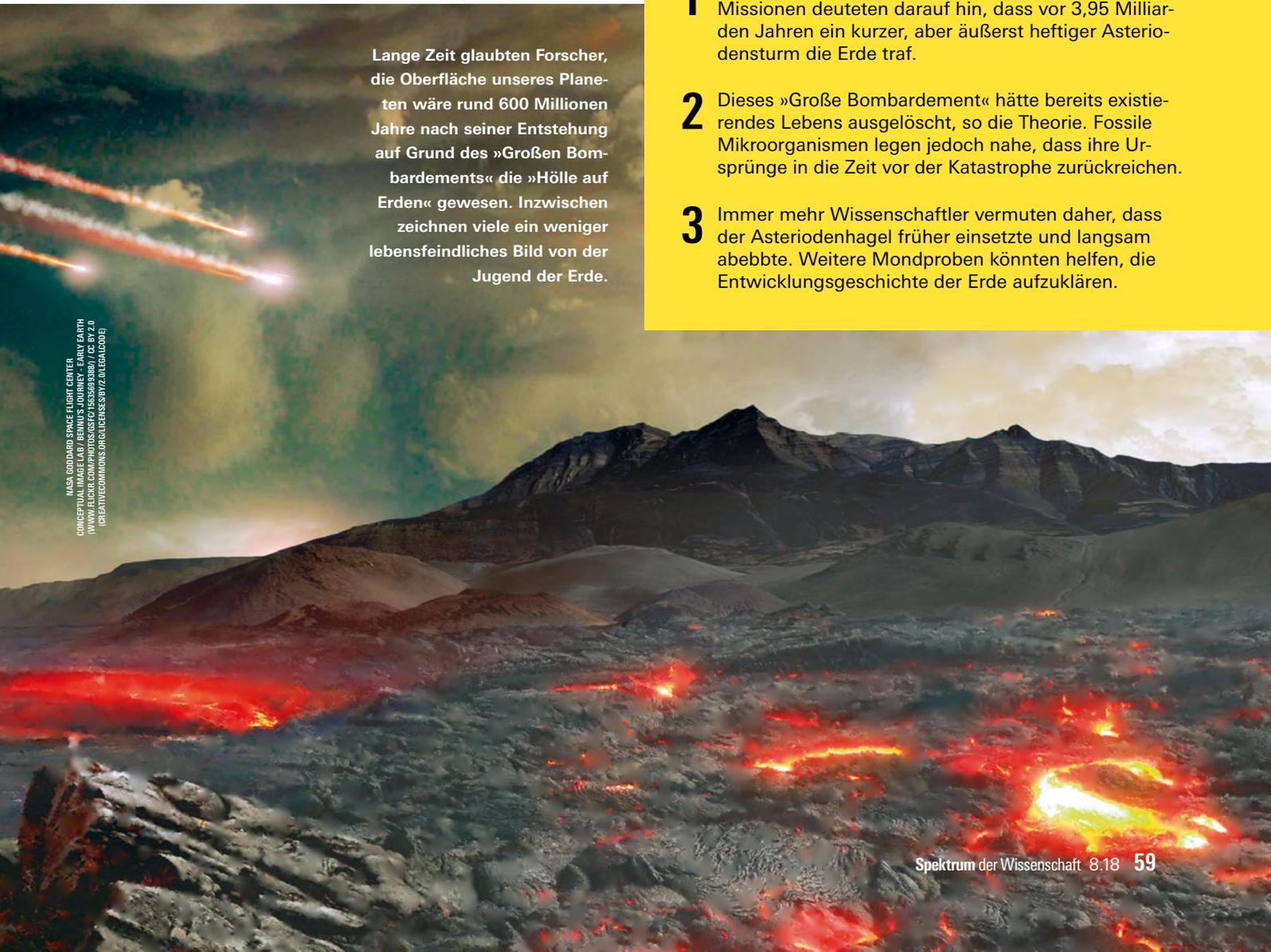
Teil 2: **September 2018**
Entstehung der Erdkruste und des Ur-Ozeans
Donald R. Prothero

Teil 3: **Oktober 2018**
Die Jagd nach den ältesten Fossilien
Rebecca Boyle

NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER
CONCEPTUAL IMAGE LAB / BENNU'S JOURNEY - EARLY EARTH
(WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/GSFC/15635953880) / CC BY 2.0
(CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/CC-BY/2.0/LEGALCODE)

onen mit zur Erde brachten. Doch jetzt gerät diese gängige Hypothese durch neue Erkenntnisse ins Wanken, und immer mehr Wissenschaftler rücken von dem Szenario ab. Viele gehen inzwischen davon aus, dass sich die Lage auf dem noch jungen Planeten relativ schnell beruhigte: Der Asteroidenhagel wurde demnach stetig schwächer, bis er wenige hundert Millionen Jahre nach der Entstehung von Erde und Mond stoppte.

Der Ausgang der Debatte über die Jugend der Erde betrifft einige der wichtigsten Fragen der Geowissenschaften: Wann entstand das Leben, und welche Bedingungen herrschten zu jener Zeit? Endgültige Antworten darauf lassen sich nach Ansicht einiger Forscher nur mit Hilfe weiterer Gesteinsproben finden. Sie hoffen, dass die USA, wie vor Kurzem angekündigt, wieder Astronauten zum Mond schickt – auch wenn es dafür noch keinen konkreten Zeitplan gibt. Bis dahin müssen sie sich mit der Aussicht anfreunden, dass ein vermeintlicher Schlüsselmoment in der Geschichte unseres Sonnensystems bedeutungslos werden könnte. »Das Große Bombardement galt als einer der großen Triumphe der Apollo-Ära«, sagt der Geochemiker Mark Harrison von der University of California in Los Angeles. »In den letzten Jahren jedoch wurde unser Bild von der frühen Erde über den Haufen geworfen.«



Lange Zeit glaubten Forscher, die Oberfläche unseres Planeten wäre rund 600 Millionen Jahre nach seiner Entstehung auf Grund des »Großen Bombardements« die »Hölle auf Erden« gewesen. Inzwischen zeichnen viele ein weniger lebensfeindliches Bild von der Jugend der Erde.

Unser Sonnensystem entstand vor 4,6 Milliarden Jahren, nachdem das Zentrum einer massereichen Wolke aus Gas und Staub zu einer dichten Kugel kollabierte und so die Sonne formte. Um diesen Stern kreisten in einem staubhaltigen Ring Gesteinstrümmer, die ständig kollidierten und bisweilen größere Aggregate bildeten. Über mehrere zehn Millionen Jahre erwachsen daraus so genannte Planetesimale – die Vorläufer der heutigen Planeten. Daneben blieben kleinere Gesteinsbrocken zurück, die in ihre größeren Verwandten krachten und dort tiefe Krater zurückließen. Im Lauf der Zeit lichtete sich die Staub- und Trümmerwolke, und das uns bekannte Planetensystem wurde allmählich sichtbar.

Auf der Erde sind die meisten Beweise dieser stürmische Anfangszeit verschwunden, auf Grund tektonischer Prozesse, die hier ständig neue Kruste bilden und alte recyceln. Die vernarbte Oberfläche des Mondes hingegen, die seit mehr als drei Milliarden Jahren inaktiv ist, erzählt

AUF EINEN BLICK KOSMISCHER BOMBENHAGEL

- 1** Frühe Analysen von Mondgesteinsproben der Apollo-Missionen deuteten darauf hin, dass vor 3,95 Milliarden Jahren ein kurzer, aber äußerst heftiger Asteroidensturm die Erde traf.
- 2** Dieses »Große Bombardement« hätte bereits existierendes Leben ausgelöscht, so die Theorie. Fossile Mikroorganismen legen jedoch nahe, dass ihre Ursprünge in die Zeit vor der Katastrophe zurückreichen.
- 3** Immer mehr Wissenschaftler vermuten daher, dass der Asteroidenhagel früher einsetzte und langsam abebbte. Weitere Mondproben könnten helfen, die Entwicklungsgeschichte der Erde aufzuklären.

eine lange Geschichte von Einschlägen. Insgesamt 382 Kilogramm Gestein und Bodenproben, die davon zeugen, brachten die Astronauten der Apollo-Missionen zurück mit auf die Erde. Auf diese Proben stürzten sich Wissenschaftler, die sich Aufschlüsse über die Vergangenheit des Erdtrabanten erhofften. 1973, ein Jahr nach der letzten Landung eines Apollo-Raumschiffs, berichtete ein Forscherteam der Sheffield University in Großbritannien von einem merkwürdigen Muster in den Proben von vier verschiedenen Apollo- und einer sowjetischen Luna-Mission. Radiometrische Untersuchungen lieferten für alle dasselbe Alter: 3,95 Milliarden Jahre. Ein Team des California Institute of Technology in Pasadena bestätigte den Befund kurz darauf.

Die Altersübereinstimmung deutete darauf hin, dass in einem engen, nur 50 Millionen Jahre großen Zeitfenster ein Gesteinshagel auf den Mond traf und dabei unzählige Krater hinterließ – einige größer als Frankreich. Offenbar handelte es sich um eine letzte, infernalische Welle nach der Geburt des Sonnensystems. Daher taufte die Caltech-Forscher das Ereignis »lunare Katastrophe«. Später setzte sich die Bezeichnung Großes Bombardement durch.

Doch von Anfang an war dieses Szenario umstritten, vor allem wegen der nicht eindeutigen Datierung des Gesteins. Die Altersbestimmung basierte in erster Linie auf dem Verhältniss von Argon-40 und Kalium-40. Letzteres ist radioaktiv und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 1,25 Milliarden Jahren in stabiles Argon-40. Bei hohen Temperaturen kann Argon-40 aus Mineralien austreten. Das macht

Mondgestein verrät Forschern so manches über die frühe Erdgeschichte. Diese Probe wurde 1971 im Rahmen der US-amerikanischen Apollo-14-Mission gesammelt.



das Verhältnis der beiden Isotope zu einer Art Uhr: Je mehr Zeit vergangen ist, seit das Gestein heiß war, desto mehr Argon-40 sollte es enthalten. Allerdings ist die Interpretation der Argon- und Kaliumkonzentrationen schwierig, weil ein und dasselbe Isotopenverhältnis auf unterschiedliche Art und Weise zu Stande gekommen sein kann: durch ein kurzes und heftiges Trommelfeuer, welches das Gestein vor 3,95 Milliarden Jahren erhitze und so Argon-40 freisetzte; oder durch einen lang andauernden, sich langsam abschwächenden Asteroidensturm, bei dem Argon-40 stoßweise aus dem Gestein austrat.

Forscher aus Nizza entwickeln ein Modell, das den verzögerten Asteroidenbeschuss erklärt

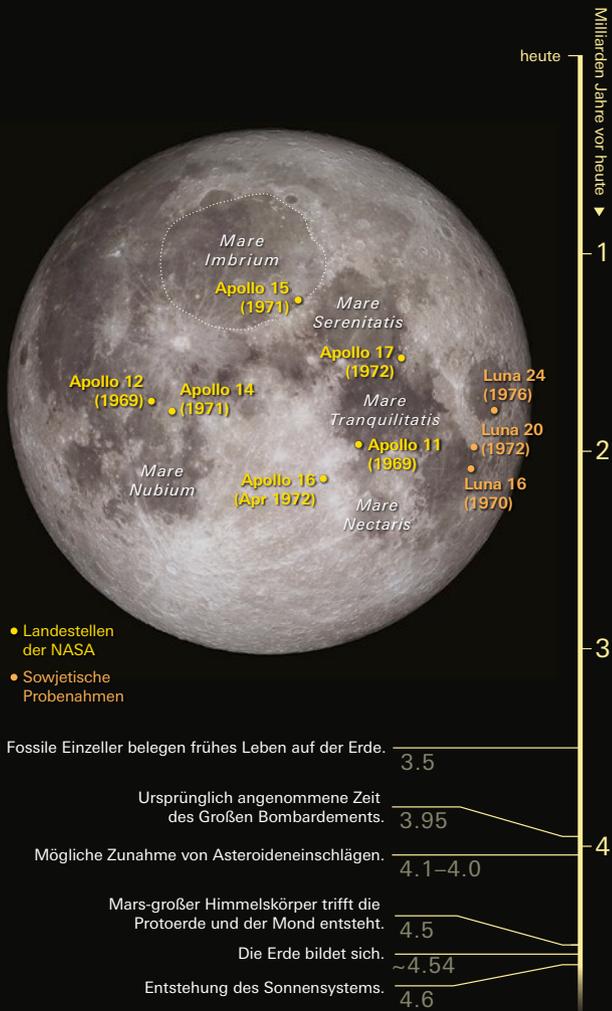
Es dauerte bis zum Jahr 2000, ehe Forscher die ersten wirklichen neuen Erkenntnisse dazu veröffentlichten. Die Astrogeologen und -chemiker David Kring, Timothy Swindle und Barbara Cohen von der University of Arizona in Tucson, sammelten Mondmeteoriten – Gesteinsbrocken, die nach Asteroideneinschlägen auf dem Mond zur Erde gelangt waren. Die Wissenschaftler hofften, dass sie repräsentativer wären als die Proben der Apollo-Missionen, die kaum vier Prozent der Mondoberfläche abdeckten. »Wir hatten damit gerechnet, dass unsere Messungen die Gesteinsproben auf bis zu 4,4 Milliarden Jahre datieren würden – und damit ein für alle Mal zeigen würden, dass die Idee des Großen Bombardements falsch ist«, sagt Swindle. Stattdessen ergaben ihre Untersuchungen keine Hinweise auf Einschläge vor jener Zeit, in der das Große Bombardement stattgefunden haben soll. »Das drängte mich geradezu, die Seite zu wechseln«, so Swindle.

Damit war jedoch nicht geklärt, wie es so lange nach der Entstehung des Sonnensystems zur lunaren Katastrophe kommen konnte. Nach einer halben Milliarde Jahre hätte der größte Teil der übrig gebliebenen Kleinkörper entweder aus dem Sonnensystem herausgeschleudert oder in stabilen Zonen angekommen sein müssen, wie dem Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter oder dem Kuipergürtel jenseits von Neptun. Physikalisch war das Bombardement zu einem so späten Zeitpunkt nicht zu erklären. »Wo hätten die Gesteinskörper herkommen sollen, die 600 Millionen Jahre irgendwo im Sonnensystem lauerten, nur um urplötzlich auf den Mond einzupraseln?«, fragt Cohen, die inzwischen am Goddard Space Flight Center der NASA arbeitet.

Eine mögliche Antwort auf diese Frage lieferte 2005 das nach seinem Ursprungsort benannte Nizza-Modell. Eigentlich sollte es die seltsamen Umlaufbahnen ferner Eiskörper im Kuipergürtel erklären. Man nahm an, dass sich die äußeren Planeten des Sonnensystems bei ihrer Entstehung deutlich näher waren als heute. Computersimulationen zeigten, dass die starken Anziehungskräfte von Jupiter und Saturn eine Instabilität erzeugten, die Uranus und Neptun auf einen weiter außen gelegenen Orbit beförderte – und zugleich Kometen und Asteroiden aus ihrer Umlaufbahn schleuderte. Das Nizza-Modell lieferte damit eine Erklärung für das Große Bombardement. »Das war der nächste große Wendepunkt«, so der Geologe Marc Norman von der Australian National University in Canberra.

Beprobung des Erdtrabanten

Altersbestimmungen von Gesteinsproben, die im Rahmen verschiedener Apollo-Missionen gesammelt wurden, deuteten auf eine Häufung von Asteroideneinschlägen auf Mond und Erde lange nach der Entstehung des Sonnensystems – das so genannte Große Bombardement. Doch inzwischen bezweifeln viele Wissenschaftler dieses Szenario. Ein möglicher Grund für das verblüffend ähnliche Alter der Gesteinsproben: Sie könnten alle aus demselben gigantischen Einschlagkrater herausgeschleudert worden sein, aus dem Mare Imbrium.



Doch just, als die Idee des Großen Bombardements wiedergeboren zu sein schien, tauchten erste Löcher in der Geschichte auf. Die Daten der Apollo-Missionen und die Kraterzählungen (bei denen Forscher aus der Überlagerung von Kratern die Reihenfolge der Einschläge bestimmen) hatten zwar angedeutet, dass drei der größten Dellen auf der erdzugewandten Seite des Mondes – die Mare Imbrium, Nectaris und Serenitatis – alle um die 3,95 Milliarden Jahre alt sein könnten. Hoch aufgelöste Karten der Aufklärungssonde Lunar Reconnaissance

Orbiter der NASA, die den Mond seit 2009 umkreist, zeigten jedoch Schuttansammlungen, die strahlenförmig vom Mare Imbrium ausgehen. Beim Einschlag könnten Gesteinsbrocken in den benachbarten Serenitatis-Krater geschleudert worden sein und die dort von den Apollo-Astronauten gesammelten Proben kontaminiert haben. Tatsächlich kam 2010 bei einer neuerlichen Analyse von vermeintlichem Nectaris-Gestein heraus, dass es jenem aus Mare Imbrium chemisch wie geologisch sehr ähnelt. »Wir realisierten allmählich, dass es sich möglicherweise bei allen Proben um Material aus dem Imbrium-Krater handelte«, erzählt Zellner.

Die aus den Mondmeteoriten gewonnenen Daten waren keine große Hilfe: Obwohl keine der Proben älter als vier Milliarden Jahre zu sein schien, waren einige deutlich jünger, bis zu mehreren Milliarden Jahren; und auch die für die Mehrzahl der Proben erwarteten 3,95 Milliarden Jahre konnten die Forscher nicht bestätigen. In den letzten Jahren lieferten genauere mikroskopische Untersuchungen des Mondgesteins jedoch ein Alter von bis zu 4,2 Milliarden Jahren. Es musste also bereits vor der Lunaren Katastrophe – sofern sie so überhaupt stattgefunden hatte – größere Einschläge gegeben haben.

Eine unzuverlässige Methode zur Altersbestimmung

Diese Ergebnisse trugen dazu bei, dass einige Forscher glaubten, man müsse die Phase des Großen Bombardements verlängern und den Startzeitpunkt vorverlegen. Allerdings gab es ein gewichtiges Argument gegen den Vorschlag: Einige der ältesten Kristalle auf der Erde (so genannte Zirkone), die aus den Jack Hills im Westen Australiens stammen, weisen darauf hin, dass die Erde vor 4,2 Milliarden Jahren bereits ein recht freundlicher Ort war, mit relativ niedrigen Temperaturen und reichlich flüssigem Wasser.

Andere Wissenschaftler überprüfen immer noch die Proben der Apollo-Missionen. Um das Alter zu bestimmen, erhitzen Forscher ursprünglich das Gestein und setzen so das darin eingeschlossene Argon frei. Doch schon 1991 wies Harrison darauf hin, dass sich diese Methode für Gesteine, die aus vielen verschiedenen Mineralen bestehen, nicht geeignet ist. Denn je nach Mineral entweicht das Argon bei einer anderen Temperatur. So kann sich bei 400 Grad Celsius ein Alter von zwei Milliarden Jahren ergeben, bei 500 Grad jedoch eins von 2,5 Milliarden. Man hat versucht, das Problem durch Extrapolation der Messwerte in den Griff zu bekommen. Harrison kritisiert, dass das komplexe Verhalten des Gesteins dazu führe, dass Forscher das Alter der Mondproben letztlich mehr oder weniger willkürlich festlegen.

Swindle hingegen hält die Kritik von Harrison für überzogen. Es gebe Gesteinsproben von den Apollo-Missionen, deren ermitteltes Alter nicht von der Temperatur abhängt. Und diese Werte scharen sich – ob sie nun von einem einzigen oder von mehreren Einschlägen stammen – noch immer um 3,95 Milliarden Jahre. Cohen ergänzt, dass Gesteinsdatierungen mittels radioaktiver Isotope (Rubidium und Uran) die Argonmessungen bestätigen würden. Harrison hält dem entgegen, dass die Altersangaben

MOND: NASA; GRAFIK: NATURE; MANN, A.; CARACUSI/SEN. ILL. IN: NATURE 553, S. 393-395, 2016. DT. BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

trotzdem um bis zu 600 Millionen Jahre voneinander abweichen können. Der Streit illustriert, wie schwer es ist, sehr altem Gestein Hinweise auf die astrogeologischen Prozesse vor mehreren Milliarden Jahren zu entlocken.

In der Zwischenzeit konnte auch das Nizza-Modell die Idee des Großen Bombardements nicht untermauern. Verfeinerte Computersimulationen der Wechselwirkungen der Gravitationskräfte im frühen Sonnensystem deuten an, dass sich die Planeten möglicherweise bereits kurz nach ihrer Entstehung neu positionierten und nicht erst nach einigen hundert Millionen Jahren. Bei einer verzögerten Neuordnung der Himmelskörper hätte sich das Sonnensystem stets am Rand der Instabilität befunden. David Nesvorný, Planetenforscher vom Southwest Research Institute in Boulder, Colorado, vergleicht die Verzögerung mit dem Versuch, einen Bleistift auf seiner Spitze zu balancieren: »Es ist praktisch unmöglich, den Stift so auszubalancieren, dass er nicht sofort umfällt sondern erst nach einer Stunde.«

Fossile Einzeller als Zeugen für die Entstehung des Lebens

Einer der Architekten des Nizza-Modells, der Astronom Alessandro Morbidelli vom Observatorium Côte d'Azur in Nizza, räumt ein, dass frühe Versionen des Modells einiges an Feinabstimmung erforderten, um die späte Neuorientierung der Planeten am Computer zu erzeugen. Er selbst glaubt inzwischen nicht mehr an das Große Bombardement und sieht auch viele andere Forscher von der Idee eines plötzlichen Asteroidensturms abrücken, zu Gunsten eines lang anhaltenden und langsam abklingenden Beschusses der Erde: »Ich gehe davon aus, dass die Idee vom Großen Bombardement beerdigt wird.«

Selbst jene, die daran festhalten, mussten ihr ursprünglichen Modelle modifizieren. William Bottke, ebenfalls Planetenforscher am Southwest Research Institute, bestätigt, dass nicht mehr viel für ein kurzes, heftiges Ereignis spricht. Seiner Ansicht nach weisen die Daten alter Erdgesteine und von Meteoriten eher auf einen stetigen Beschuss hin, der vor etwa 4 bis 4,1 Milliarden Jahren einsetzte. Davor habe es kaum Einschläge gegeben, was auch zu dem Vorhandensein von Wasser auf der Erdoberfläche in dieser frühen Phase passt.

Der Astronom William Hartmann, der zur Zeit als Gastwissenschaftler am International Space Science Institute in Bern tätig ist, sieht in der gegenwärtigen Diskussion den Beleg dafür, dass die Hypothese vom großen Bombardement nie wirklich strapazierfähig war. Verschiedene Forschergruppen hätten jeweils gedacht, andere hätten das Problem gelöst. So sei ein Paradigma auf Beweisen aufgebaut worden, die in sich selbst nie schlüssig waren.

Wenn das Große Bombardement nie stattgefunden hat, dann ist auch die Entstehung des Lebens leichter zu erklären. Forscher haben in 3,5 Milliarden Jahre altem Gestein fossile Mikroorganismen gefunden, die bereits relativ komplex erscheinen und sich vermutlich – von der ersten, primitiven Zelle ausgehend – im Lauf mehrerer hundert Millionen Jahre entwickelten. Demnach wären die ersten Organismen zu genau der Zeit entstanden, als ein

vermeintlicher Asteroidenhagel die Erde getroffen haben soll – den die Einzeller aber wohl nicht überlebt hätten. Ohne das Große Bombardement ergibt ein derart früher Ursprung des Lebens mehr Sinn. Andererseits deutet einiges darauf hin, dass die ersten Mikroben hyperthermophil waren und extreme Hitze (über 80 Grad Celsius) bevorzugten. Asteroideneinschläge könnten in bestimmten Regionen der Erde optimale Bedingungen für die Entstehung solcher Organismen geschaffen haben.

Bemühungen, die Diskussion um das Große Bombardement mit Hilfe von Hinweisen anderer potenzieller Opfer des Asteroidensturms wie Merkur, Mars und Venus zu beenden, sind bislang gescheitert. Die Anhänger der verschiedenen Hypothesen werfen sich gegenseitig vor, Rosinenpickerei zu betreiben, sprich nur die Daten zu berücksichtigen, die den eigenen Standpunkt unterstützen, und dabei das Gesamtbild zu ignorieren.

Vieler Wissenschaftler glauben, dass nur weitere Gesteinsproben vom Mond die Debatte voranbringen können. Kring, der inzwischen am Lunar and Planetary Institute in Houston forscht, hat einige Konzeptstudien für das Einsammeln von extraterrestrischem Material und den Transport zur Erde erstellt. Darunter ist auch eine bemannte Mission zum Südpol-Aitken-Becken, dem größten und ältesten Mondkrater. Allerdings liegt die nächste bemannte Mission zum Erdtrabanten noch in weiter Ferne. Schon 2019 könnten dagegen im Rahmen der unbemannten chinesischen Chang'e-5-Mission Proben vom Mond zur Erde gelangen. Die Mondlandesonde soll zwei Kilogramm Boden- und Gesteinsproben in einer vulkanischen Bergregion namens Mons Rümker sammeln, die jünger ist als jene, die die Apollo-Astronauten besuchten.

Vermutlich wird keine einzelne Monderkundung den Streit um die wilde Jugend der Erde beenden. Doch mit dem heute besseren Verständnis des Erdtrabanten und der Altersbestimmung von Mondgestein, sollten die Forscher künftig gewonnenen Ergebnissen mehr Vertrauen schenken können. ◀

QUELLEN

Cohen, B. A. et al.: Support for the Lunar Cataclysm Hypothesis from Lunar Meteorite Impact Melt Ages. In: *Science* 290, S. 1754–1756, 2000

Gomes, R. et al.: Origin of the Cataclysmic Late Heavy Bombardment Period of the Terrestrial Planets. In: *Nature* 435, S. 466–469, 2005

Morbidelli, A. et al.: A Sawtooth-like Timeline for the First Billion Years of Lunar Bombardment. In: *Earth and Planetary Science Letters* 355–356, S. 144–151, 2012

Morbidelli, A. et al.: The Timeline of the Lunar Bombardment: Revisited. In: *Icarus* 305, S. 262–272, 2018

Watson, E. B., Harrison, T. M.: Zircon Thermometer Reveals Minimum Melting Conditions on Earliest Earth. In: *Nature* 308, S. 841–844, 2005

nature

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 553 S. 393–395, 11. Januar 2018

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

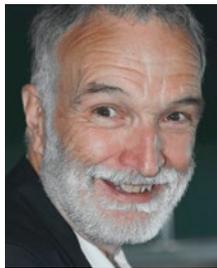
www.spektrum.de/aktion/persoenlichkeit



Mehr als
150
Digitalausgaben
zur Wahl!

Print | € 5,90
Download | € 4,99

SCHLICHTING! ZUGLEICH DIFFUS UND SPIEGELND



Wer bei Reflexionen nur an Spiegelbilder denkt, übersieht leicht das Licht, das raue Oberflächen ungerichtet zurückwerfen. Meist treten beide Erscheinungen gemeinsam auf.

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

► spektrum.de/artikel/1573456

In dem, was sich mir so als Raum des Lichts darstellt, bedeutet Blick immer ein Spiel von Licht und Undurchdringlichkeit. Es geht stets um ein Spiegeln.

Jacques Lacan (1901–1981)

► Als ich einmal auf jemanden wartete, ging ich vor der leicht konvex gebauten Glasfront eines Gebäudes auf und ab. Dabei blendete mich die hell erleuchtete Pflasterung des Gehwegs. Hier warf gerade eines der Fensterelemente die Sonnenstrahlen auf die Steine (siehe oberes Foto rechte Seite). Normalerweise nehmen wir deren Eigenfarbe wahr, weil sie das Licht diffus in viele Richtungen reflektieren. An der betreffenden Stelle jedoch geriet das Sonnenlicht auf zwei verschiedene Weisen in meine Augen: Die diffuse Reflexion überlagerte sich mit einer spiegelnden.

Diese Aufhellung verschwand allmählich, als ich mich von ihr wegbewegte (mittleres Foto rechte Seite). Dafür tauchte – zunächst schemenhaft, dann immer intensiver – ein weiterer Streifen durch die Rückstrahlung der nächsten Scheibe auf (unteres Foto). Sie erreichte ihre maximale Helligkeit im Reflexionswinkel des dort gespiegelten Lichts.



H. JOACHIM SCHLICHTING

Wenn man in einem Raum seinen Standpunkt wechselt, ändert sich die Position des diffus reflektierten Sonnenlichts nicht – auf dem Foto zu erkennen an der gelblichen Eigenfarbe des Fußbodens. Der bläuliche spiegelnde Reflex des Himmels läuft hingegen mit dem Beobachter mit. Bringt man beides zum Überlappen, wird das Sonnenlicht spiegelnd in die Augen reflektiert.

Ein solches Phänomen zeigt also sowohl spiegelnde als auch diffuse Merkmale. Ein perfekter Spiegel hat bekanntlich keine eigene Farbe, sondern nimmt die der Gegenstände an, die er abbildet. Hier allerdings behält der Boden weitgehend seine rötliche Farbe bei. Außerdem sieht man bei einem Spiegel eine Aufhellung nur, wenn man direkt von ihrem Licht getroffen wird. Das liegt an den Regeln der Strahlenoptik: Das unter einem bestimmten Einfallswinkel auftreffende Licht wird stets unter einem gleich großen Reflexionswinkel wieder ausgestrahlt. Nur wenn man sich in dessen Bereich befindet, kann man es wahrnehmen.

In diesem Fall war die Aufhellung aber auch noch aus anderen Blickwinkeln zu sehen. Das lässt eine diffuse Reflexion vermuten, bei der Unebenheiten der reflektierenden Fläche das Licht in ganz unterschiedliche Richtungen werfen. Die Tatsache jedoch, dass die Helligkeit mit der Abweichung vom Reflexionswinkel erst allmählich verschwindet, spricht dafür, dass die Reflexion nicht völlig diffus ist, sondern mit der spiegelnden Reflexion zusammenhängt.

Im Reflexionswinkel vor der Glasscheibe ist die Pflasterung hell erleuchtet (oben). Entfernt man sich, wird der Streifen immer schwächer (Mitte) und verschwindet schließlich. Nun wirft die nächste Scheibe eine schimmernde Bahn (unten).

Die einzelnen Pflastersteine reflektieren das Licht mit ihren relativ glatten Oberflächen zwar zu einem beträchtlichen Teil spiegelnd. Sie sind aber individuell leicht zur durchschnittlichen Ebene des Gehwegs geneigt. Die Unterschiede betreffen nur einen relativ kleinen Winkelbereich, und größere Ausreißer sind sehr selten. Darum fällt mit zunehmender Entfernung vom Reflexionswinkel des Bodens immer weniger spiegelnd reflektiertes Licht ins Auge.

In gewisser Weise erinnert das Phänomen an das »Schwert der Sonne« auf dem Wasser, das durch unterschiedlich orientierte Wellenflanken zu Stande kommt (siehe »Lichtbahnen über den Wellen«, **Spektrum** Juni 2017, S. 58). Diese glänzende Bahn ist stets auf den Beobachter gerichtet und wandert mit ihm mit. Die flächenhafte Scheibe hingegen reflektiert das Licht in genau eine Richtung. Das kommt auch auf dem Wasser vor, wenn zum Beispiel das Fenster eines Boots Licht auf die Oberfläche spiegelt. Dann verschwindet die Aufhellung, wenn man sich aus der Reflexionsrichtung herausbewegt.

Himmlicher Glanz im Zimmer

Eine auf den ersten Blick vergleichbare Situation ergibt sich bei Sonnenstrahlen, die durch ein Fenster auf einen glatten Fußboden fallen. Dieser reflektiert ähnlich wie das Pflaster sowohl diffus als auch spiegelnd (siehe Foto linke Seite). Die Aufhellung des Fußbodens ist von jeder Stelle des Raums aus zu erkennen. Tatsächlich ist das beim Pflaster nicht anders – dessen diffuse Reflexion der direkten Sonnenstrahlung ist ebenfalls aus allen Richtungen zu sehen. Sie fällt bloß deshalb nicht besonders auf, weil (abgesehen von einzelnen Schattenwürfen) das gesamte Pflaster betroffen ist und nicht nur ein klar umrissener Bereich.

Von der spiegelnden Reflexion durch den Fußboden sieht man erst dann etwas, wenn man sich in dessen Reflexionswinkel stellt. Dann fällt das Sonnenlicht blendend in die Augen. Der Effekt rührt von der direkten Einstrahlung her und wäre auf dem Pflaster ebenso zu erfahren, falls man zur Sonne gewandt auf den Boden blickte. Dann würde der Reflex sogar jede Standpunktveränderung mitmachen.

Auch im Zimmer verfolgt eine Lichtbahn den Beobachter, wo immer er sich im Raum befindet. Sie rührt jedoch nur indirekt von der Sonne her. Es handelt sich um die spiegelnde Reflexion des vom Fenster ausgeschnittenen Bereichs des Himmels. Das verrät bereits die leichte Blaufärbung. Unebenheiten des Fußbodens verzerren die Form – ähnlich wie Wellen auf dem Wasser.



H. JOACHIM SCHLICHTING



TECHNIK REVOLUTIONÄRE KAMERAS

Neuartige Mikroskope und FOTOSENSOREN kommen ohne Linse oder Spiegel aus, ihre Bilder sind jedoch für Menschen zunächst nicht entzifferbar. Erst die digitale Verarbeitung mit maßgeschneiderten Computerprogrammen produziert qualitativ hochwertige Aufnahmen.



David G. Stork (links) ist Rampus Fellow an den Rampus Labs in Sunnyvale, Kalifornien. Er hat an der University of Maryland in Physik promoviert. **Aydogan Ozcan** (Mitte) promovierte an der Stanford University in Elektrotechnik und leitet inzwischen das Labor für Bio- und Nanophotonik an der University of California in Los Angeles. **Patrick R. Gill** ist Wissenschaftler an den Rampus Labs. Er hat an der University of California in Berkeley in Biophysik promoviert.

► spektrum.de/artikel/1573458

AUF EINEN BLICK BILDER AUS DEM NICHTS

- 1** In der herkömmlichen Bildgebung nutzen wir Spiegel und Linsen, um Lichtstrahlen abzulenken und zu fokussieren.
- 2** Neuartige Kameras und Mikroskope nehmen allerdings kein Bild mehr für den Menschen auf, sondern für einen Computer. Die digitalen Programme übernehmen dabei die Rolle optischer Apparaturen.
- 3** In Zukunft können wir Bilder ohne Spiegel und Linsen aufnehmen: die Geräte werden dadurch deutlich kleiner und erschwinglicher.

► Im Mittelalter schliffen Handwerker erstmals Linsen und krümmten Spiegel, um Lichtstrahlen gezielt abzulenken. Aus diesen optischen Elementen bauten sie Mikroskope, Lochkameras, Teleskope und andere Instrumente, die sowohl sehr kleine als auch sehr große Objekte sichtbar machen: von Körperzellen bis hin zu fernen Planeten.

Mitte des 19. Jahrhunderts führte die Erfindung der Fotografie zu einem Wendepunkt im Gebiet der Optik; nun konnte man die erfassten Bilder permanent festhalten und beliebig oft vervielfältigen. Doch die Ära der ursprünglichen chemischen Fotografie ist zu Ende: Die digitale Bildgebung hat sie inzwischen fast vollständig verdrängt.

Die Fernstehteknik ebnete den Weg zu diesem dritten Durchbruch, den 1975 die erste Digitalkamera einleitete. Heute nehmen Milliarden Webcams, Digital- und Videokameras weltweit mehr als eine Billion Bilder im Jahr auf.

Paradoxerweise sieht in dieser bildüberschwemmten Ära kaum noch jemand ein direktes optisches Bild: Längst sind die Zeiten vergangen, in denen ein Fotograf durch die Mattscheibe einer Kamera blickte, bevor er eine neue Filmplatte einführte. Stattdessen schauen wir auf Bildschirme, die digital verarbeitete Daten wiedergeben.

In den letzten ein bis zwei Jahrzehnten trat nun eine weitere Technologie hervor, die zu einer vierten Revolution der Bildgebung führt. Diese computergestützten Verfahren werden die herkömmliche Technik zwar nicht gänzlich ersetzen, aber sie stellen jahrhundertlange Annahmen in

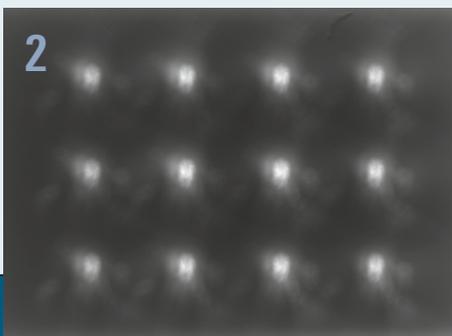
Künftige Kameras und
Mikroskope könnten in
Zukunft sehr viel kleiner und
günstiger ausfallen.



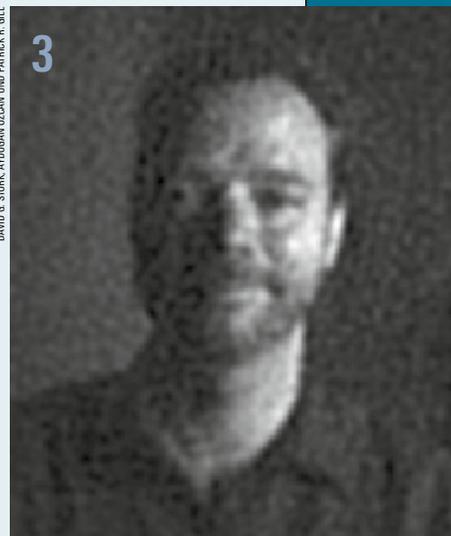
LUCISCHEM / GETTY IMAGES / STOCK

Über Umwege zum Bild

Anstatt Lichtstrahlen mit Linsen zu fokussieren, nutzt man nun auch optische Gitter, um die Strahlen zu beugen. In diesem Beispiel ist ein Feld mit zwölf mikroskopischen »binären Phasengittern« (1) so konstruiert worden, dass es möglichst viel visuelle Information einer Szene aufnimmt. Vor der digitalen Verarbeitung besteht das Bild aus zwölf verschwommenen Punkten (2). Dennoch enthält das Bild genügend Daten, so dass ein maßgeschneiderter Algorithmus ein annehmbares Endergebnis liefert (3).



DAVID G. STORK, AVDİGAN OZCAN UND PATRICK R. BILL



Frage und haben bereits zu bedeutenden Fortschritten geführt: von mikroskopisch kleinen Bildsensoren, die makroskopische Objekte abbilden, bis hin zu Geräten, die komplett ohne Linse oder Spiegel auskommen.

Schon lange nutzen wir Computerprogramme, um Bilder nachträglich zu bearbeiten, etwa um rote Augen auszubessern oder die kräftigen Farben eines Sonnenuntergangs getreuer darzustellen. Mit der passenden Software kann man sogar die Fehler defekter Geräte beheben. Als das Hubble-Teleskop Ende der 1980er Jahre die ersten Daten aus dem Orbit an die Erde sandte, waren die Bilder verschwommener als erwartet (siehe Bild unten). Die Wissenschaftler der NASA erkannten schnell einen Fehler in der Apparatur des Teleskops, doch es sollte Jahre dauern, ihn zu beheben. Um diese Zeit zu überbrücken, entwickelten die Forscher anspruchsvolle digitale Verarbeitungsalgorithmen, welche die Signale des Hubble-Teleskops automatisch nachbesserten.

Während die Bildbearbeitungsprogramme immer weiterverbessert wurden, blieb der Aufbau der Geräte größtenteils unangetastet. Dies änderte sich erstmals Mitte der 1990er Jahre, als W. Thomas Cathey und Edward R. Dowski jr. optische Instrumente bauten, die vorsätzlich verschwommene Bilder aufnehmen. Nachdem sie die

Die ersten Aufnahmen des Hubble-Teleskops waren verschwommen (oben) und kaum besser als die eines Teleskops auf der Erde. Ingenieure haben daraufhin spezielle Verarbeitungsalgorithmen entworfen, welche die fehlerhafte Apparatur des Teleskops zumindest teilweise ausgleichen (unten).

Abbildungen digital nachbearbeitet hatten, war das Ergebnis allerdings so scharf, dass es selbst hochwertigste Fotografien in den Schatten stellte.

Alle herkömmlichen Kameras haben nämlich eine beschränkte Tiefenschärfe: Fokussiert man auf ein Objekt mittlerer Entfernung, erscheint dieses scharf, wohingegen nähere oder fernere Gegenstände verschwimmen.

Durch das von Cathey und Dowski entwickelte Linsenelement wirkt ein Motiv in allen Entfernungen gleich verschwommen. Ein spezieller Algorithmus schärft aber anschließend das gesamte Bild und erweitert die Tiefenschärfe somit über die Möglichkeiten herkömmlicher Kameras hinaus. Diese Pionierarbeit ebnete den Weg zur Entwicklung computergestützter Bildgebungsverfahren.

Algorithmen statt Linsen

Die neue Technik kann den Aufbau von Kameras stark vereinfachen. In einer Handykamera gibt es sieben oder acht kombinierte Linsenelemente; eine professionelle Kamera enthält zum Teil über 15 von ihnen. Sie korrigieren Mängel oder Abbildungsfehler wie Farbunschärfen oder Bildverzerrungen, die in allen solchen Geräten auftreten.

Doch stattdessen können spezielle Computerprogramme einen Teil der optischen Apparatur ersetzen. Ohne Qualität einzubüßen, spart man so einige Linsenelemente ein; die Kameras werden dadurch kleiner und günstiger.

Aber wie viele Aufgaben kann man eigentlich von der Technik in die Informatik übertragen? Kann man auf Linsen und gekrümmte Spiegel vielleicht sogar komplett verzichten?

Tatsächlich haben Forscher in den letzten Jahren drei neue Bildgebungsverfahren entwickelt, die ganz ohne Linsen auskommen. Sie basieren auf den Prinzipien der Beugung, der Rekonstruktion optischer Phasen sowie dem »Compressive Sensing« (vergleiche S. 71). Auch wenn sich die drei Ansätze grundlegend voneinander unterscheiden, so haben sie doch eines gemeinsam: Die durch sie aufgenommenen Bilder werden erst nach digitaler Verarbeitung für Menschen erkennbar.

Um scharfe Bilder zu erzeugen, muss man Lichtstrahlen ablenken und bündeln. Gewöhnliche Linsen fokussieren Lichtstrahlen durch Brechung. Dringt Licht von einem Medium (etwa Luft) in ein anderes (wie Glas oder Wasser), in dem die Lichtgeschwindigkeit einen anderen Wert hat, ändert der Lichtstrahl seine Ausbreitungsrichtung. Darum erscheint ein Bleistift in einem Wasserglas geknickt.

Gekrümmte Spiegel, wie sie in astronomischen Teleskopen vorkommen, erzeugen ihre Bilder dagegen durch Reflexion. Die Lichtstrahlen werden an der gekrümmten Oberfläche des Spiegels in unterschiedliche Richtungen reflektiert und verzerren das Bild.

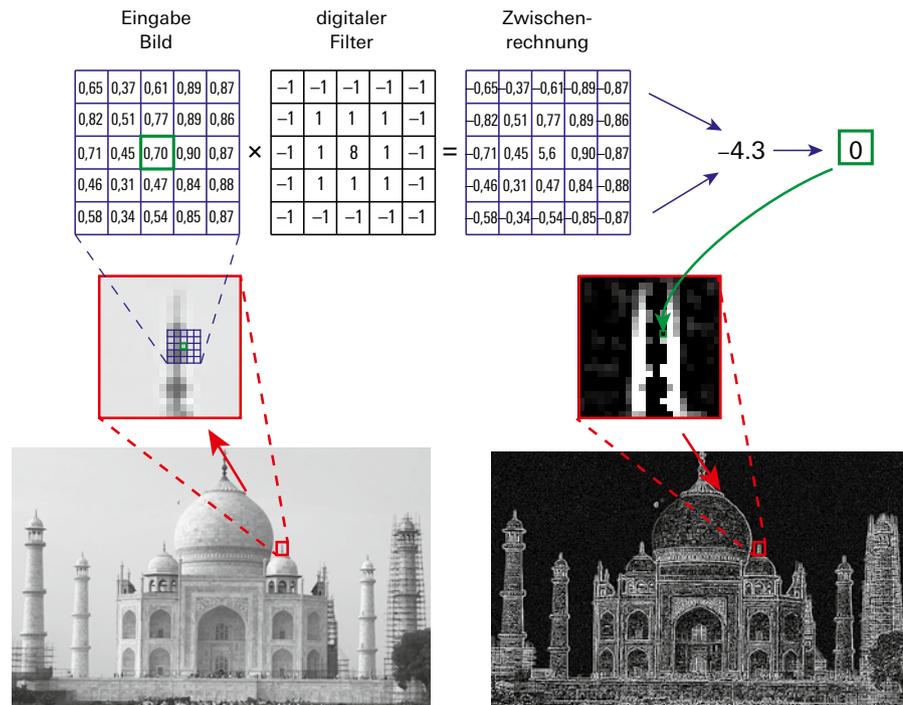
Reflexion und Brechung kann man sich am besten vorstellen, indem man Lichtstrahlen als sich parallel zueinander ausbreitende Geraden ansieht. Die modernen computergestützten Bildgebungsverfahren nutzen dagegen die optischen Phänomene der »Interferenz« und »Beugung«. Um diese zu verstehen, genügt es nicht, Licht als einfachen Strahl zu betrachten, sondern muss zusätzlich dessen Wellennatur berücksichtigen.

RICHARD R. WHITE, MIT FRIEDL, GERN VON BANG, G. STIRK, AVDODGAN, UZZANI, UMIR, PARKER, R. GILL



Bildfaltung

Bei der mathematischen Methode der Faltung wird zunächst jedem Pixel eines Bilds eine Zahl zugeordnet (hier ist ein Bildausschnitt mit 5×5 Pixeln dargestellt). Die Zahlen werden mit einem digitalen Filter multipliziert und anschließend aufaddiert, um einen Mittelwert zu bilden (hier: -4.3). Jede Zahl, die kleiner als 0 ist, wird in diesem Fall als schwarz gewertet. Die Faltung mit diesem Filter (häufig auch Kantendetektor genannt) hebt Änderungen hervor und schärft dadurch das Bild.



Wenn zwei Lichtwellen sich kreuzen, interferieren sie, das heißt, ihre Amplituden addieren sich: Wenn die Maxima beider Strahlen aufeinandertreffen, verstärken sie sich gegenseitig, Physiker sprechen dann von konstruktiver Interferenz. Wenn hingegen auf das Maximum eines Strahls das Minimum des anderen kommt, löschen sich die Wellen gegenseitig aus – sie interferieren destruktiv – und es gibt kein Licht.

Begegnen Lichtstrahlen wiederum einem Hindernis, werden sie daran abgelenkt. Die exakte Beugungsrichtung hängt allerdings von der Wellenlänge des Lichts ab. Um diesen Vorgang genau zu kontrollieren, nutzen Wissenschaftler speziell angefertigte Oberflächen, die mit mikroskopischen Kämme durchsetzt sind, so genannte Beugungsgitter. Trifft beispielsweise weißes Licht auf die Oberfläche einer DVD, die viele kleine Einkerbungen aufweist, werden die einzelnen Wellenlängen unterschiedlich reflektiert, und der Strahl spaltet sich in die Farben des Regenbogens auf. Da jede Farbe anders abgelenkt wird, kann ein Gitter niemals eine herkömmliche Linse vollständig ersetzen. Nichtsdestotrotz kann man mit der passenden Software auch Beugungsgitter nutzen, um annehmbare Bilder zu erzeugen (siehe »Die Farbe macht den Unterschied«, S. 71).

Die erste Klasse linsenloser Geräte bildet makroskopische Objekte mit Hilfe von Beugungsgittern ab. Diese bestehen aus Verdickungen (»Stufen«) eines transparenten Materials (etwa Glas oder Silikate, siehe das obere Bild auf S. 70), die einen Teil des einfallenden Lichts gegenüber dem Rest verzögern. Die Stufen sind so angeordnet, dass die Ablenkung des Lichts kaum von dessen Wellenlänge

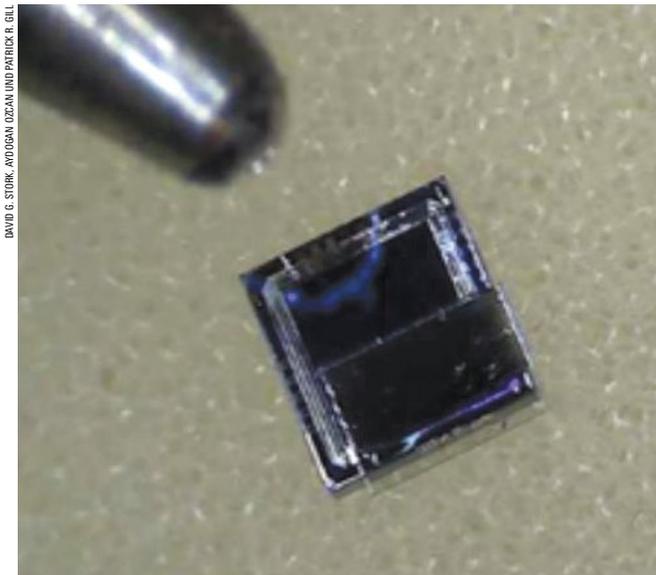
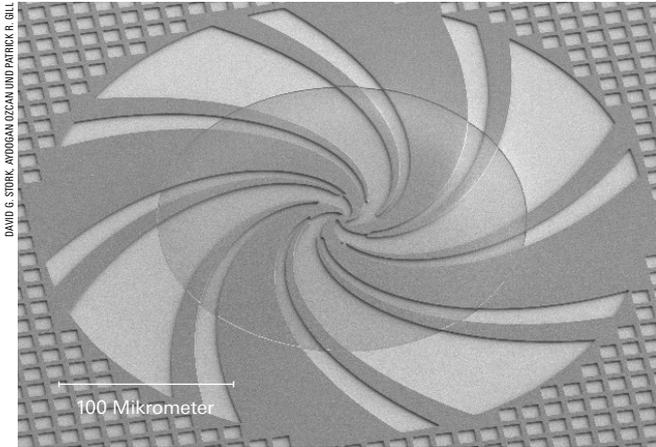
abhängt. Dadurch fallen auch ungewollte Schwankungen in der Stufenhöhe, die bei der Herstellung unvermeidbar sind, nicht allzu sehr ins Gewicht.

Die Beugungsgitter sitzen auf einem Fotodetektorfeld, das dem lichtempfindlichen Sensor einer gewöhnlichen Digitalkamera ähnelt. Das Licht eines Objekts trifft zuerst auf das Gitter und wird daran gebeugt. Auf dem Feld entsteht dann ein Lichtmuster, das nicht wie ein gewohntes Bild aussieht. Es ist weder »schön« noch scharf, sondern gleicht eher einem diffusen Klecks. Dennoch enthält dieser Klecks genügend visuelle Information, um mit einer digitalen Methode, die auf dem mathematischen Prinzip der Faltung beruht, das gewünschte Abbild des Objekts zu erzeugen (siehe »Bildfaltung«, oben).

Viele Aufnahmen führen zum Ziel

Dieser Bildrekonstruktionsalgorithmus ist allerdings sehr sensibel: Äußere Schwankungen können das Endergebnis stark beeinflussen. Ist etwa die Anzahl der eintreffenden Photonen nicht konstant, führt das zu einem leicht fleckigen Bild (siehe »Über Umwege zum Bild«, S. 67). Doch auch wenn das Ergebnis nicht ganz perfekt ist, kann man es für viele einfache Anwendungen nutzen, etwa um Menschen in einem Raum zu zählen.

Um ein qualitativ hochwertigeres Bild aufzunehmen, braucht man mehr visuelle Daten. Diese kann man durch zusätzliche Beugungsgitter beschaffen – von denen jedes einzelne speziell dafür konstruiert wurde, eine bestimmte Information in einer Szene festzuhalten. Die digitale Verarbeitung der gesamten Daten führt dann zu einem einzelnen, hoch aufgelösten Bild.



Das obere Bild zeigt ein binäres Phasengitter, das in ein helles Silikat geritzt ist. Im unteren befindet sich zum Größenvergleich die Spitze eines Kugelschreibers neben einem linsenlosen Aufnahmegerät. Dieses besteht aus einem Beugungsgitter, einem Fotodetektorfeld, einem Stromkreis und einer Signalschaltung.

Selbst bewegte Szenen lassen sich mit diesem Verfahren untersuchen. Man kann beispielsweise die An- oder Abwesenheit eines menschlichen Gesichts in einem Raum erfassen oder die Richtung und Geschwindigkeit einer sich bewegenden Gruppe messen.

Das Beugungsgitter und die Software müssen aber an ihre spezifische Aufgabe angepasst werden. Möchte man etwa einen vertikalen Barcode entziffern, sollte das Gitter selbst auch vertikal sein. Da die genaue Farbkodierung in einem Barcode keine Rolle spielt, werden helle Pixel im digitalen Bild in weiße und dunkle in schwarze umgewandelt. Ein spezieller Algorithmus kann dieses digitale Schwarz-Weiß-Bild dann einlesen und interpretieren.

Bei der zweiten Klasse linsenloser Geräte handelt es sich um Mikroskope, die ebenfalls das Prinzip der Beugung nutzen, um Objekte abzubilden. Im Gegensatz zu

einer normalen Kamera, bei der die Sonne oder eine helle Lampe als Lichtquelle dient, kann man bei einem Mikroskop kohärentes (einfarbiges) Licht von einem Laser oder einer Leuchtdiode nutzen und so die Beugungs- und Interferenzeffekte besser kontrollieren. Da die abzubildenden Proben selbst so klein sind, dass Lichtstrahlen an ihnen gebeugt werden, benötigt man kein zusätzliches Beugungsgitter.

Bei diesen »On-Chip-Mikroskopen« wird die Probe direkt auf dem Fotodetektorfeld platziert, das etwa zehn Megapixel besitzt. Die von einer LED oder einem Laser stammenden Lichtstrahlen (Objektstrahlen) werden an der Probe gebeugt und treffen auf das Licht, das die Probe ungehindert passiert – den so genannten Referenzstrahl. Das Fotodetektorfeld nimmt das resultierende komplizierte Interferenzmuster auf, das ungefähr den Schattenwurf der Probe widerspiegelt. In manchen Fällen kann man damit erahnen, wie viele Objekte sich an welcher Stelle befanden. Allerdings ist das Bild verschwommen und fleckig, ohne der Probe wirklich zu ähneln.

Bevor aus dem Interferenzmuster ein annehmbares Bild wird, durchläuft es einige digitale Prozesse. Der zentrale Schritt ist dabei der »Phasen-Rekonstruktionsalgorithmus«. Um optische Wellen zu beschreiben, muss man die Phasenwinkel kennen, die ihre Schwingung charakterisieren. Sobald der Objekt- und der Referenzstrahl allerdings zusammentreffen, geht die Information über ihre ursprünglichen Phasenwinkel verloren. Das Fotodetektorfeld verzeichnet nur die Eigenschaften des Interferenzmusters als insgesamt.

Winzige Mikroskope

Der Phasen-Rekonstruktionsalgorithmus ermittelt den Phasenwinkel des Objektstrahls, der das Interferenzmuster am wahrscheinlichsten erzeugt haben könnte. Sobald der Phasenwinkel abgeschätzt ist, kehrt der Algorithmus den ermittelten Objektstrahl zeitlich um und berechnet daraus das Bild der Probe.

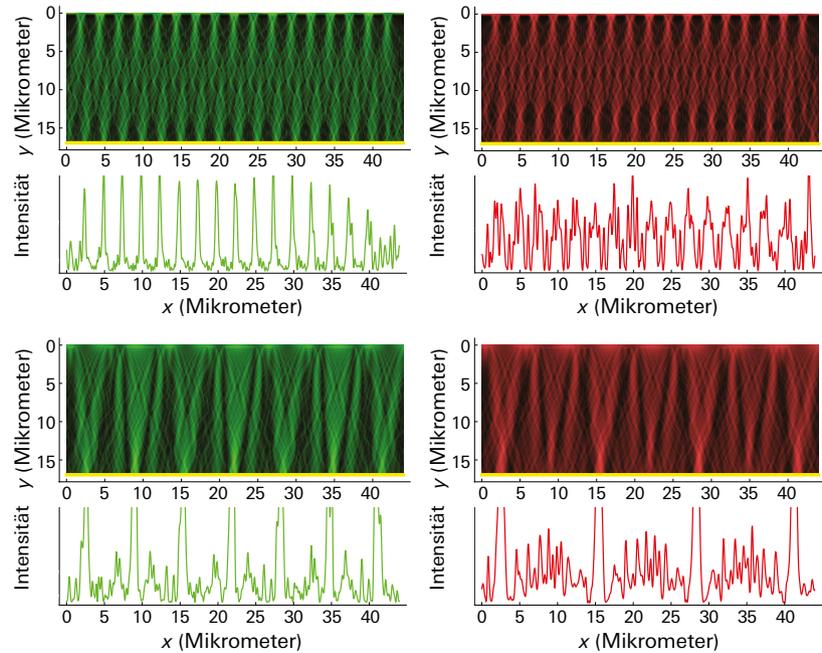
Auch in diesem Fall lässt sich die Auflösung verbessern, indem man mehrere leicht voneinander abweichende Bilder aufnimmt (siehe Bild S. 71, unten). Die Beleuchtungsquelle oder das Fotodetektorfeld können beispielsweise zwischen den Aufnahmen leicht verschoben werden. Ein Computerprogramm liest dann die Daten aus und verbindet sie zu einem einzigen hoch aufgelösten Interferenzbild, das dem menschlichen Auge allerdings immer noch als verschwommener Fleck erscheint. Der Phasen-Rekonstruktionsalgorithmus erzeugt schließlich das endgültige Bild der Probe.

Diese linsenlosen On-Chip-Geräte bieten vier große Vorteile gegenüber herkömmlichen Mikroskopen:

- ▶ Die Fläche einer Probe kann sehr groß sein – sogar so groß wie das Fotodetektorfeld selbst, da sie direkt auf dem Sensor aufliegt. Inzwischen reichen die Maße moderner Fotodetektorfelder von 20 Quadratmillimetern bis hin zu 20 Quadratzentimetern.
- ▶ Die linsenlosen Mikroskope können sogar transparente Objekte abbilden, solange die Probe auf die Phase des sie durchquerenden Lichts wirkt. Das ist der Fall bei

Die Farbe macht den Unterschied

Eine Computersimulation zeigt das Interferenzmuster von grünem und rotem Licht, das ein gläsernes Gitter passiert. Die Helligkeit gibt an, wie tief das Licht in das Glas eindringt. Ein Gitter aus senkrechten Kerben erzeugt ein periodisches Lichtmuster (oben), dessen Eindringtiefe von der Farbe abhängt. Beim binären Phasengitter (oberes Bild auf S. 70) hängt das entstehende Muster (unten) jedoch kaum von der Wellenlänge ab; es eignet sich also besser zur Aufnahme von Bildern.



DAVID G. STORIK, AYDOGAN OZCAN UND PATRICK R. GILL

Glasperlen oder den meisten im Wasser vorkommenden Bakterien. (Einige herkömmliche Mikroskope können auch klare Objekte darstellen, dafür müssen die Proben aber extrem klein sein.)

► Die digitale Verarbeitung ermöglicht es, zwischen verschiedenen Zelltypen zu unterscheiden und ihre Bewegung zu orten. On-Chip-Mikroskope können zum Beispiel bewegliche Spermazellen (siehe Bild auf S. 72, unten) oder fließende Blutzellen in einem schmalen Kanal erfassen.

► Außerdem sind diese Mikroskope deutlich günstiger und handlicher als ihre linsenbasierten Gegenstücke. Sie können beispielsweise an ein Mobiltelefon angebracht werden. In ländlichen Gegenden von Entwicklungsländern könnten Ärzte vor Ort Proben aufnehmen und die Bilddaten weltweit an Experten schicken, die sie dann analysieren.

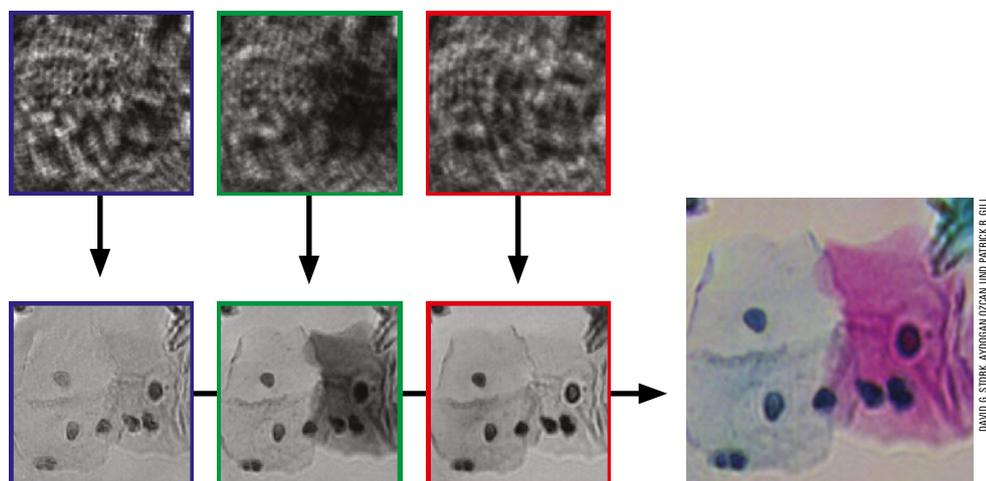
Der dritte Ansatz der linsenlosen Fotografie basiert auf einem aktuellen Fortschritt in der Mathematik: dem Com-

pressive Sensing. Dabei wird ein komplexes Bild in mehrere einfache Bilder zerlegt – so wie sich in der Musik komplizierte Töne aus einfachen Obertönen zusammensetzen. Ein Sortiment solcher einfachen Töne oder Bilder nennt man Basis. In der Musik sind reine Sinuswellen die geläufigste Basis. Egal wie kompliziert ein Ton ist – von einem Hupsignal bis hin zum Schlussakkord einer Sinfonie von Beethoven: Er kann durch das geeignete Aufaddieren solcher Sinuswellen erzeugt werden.

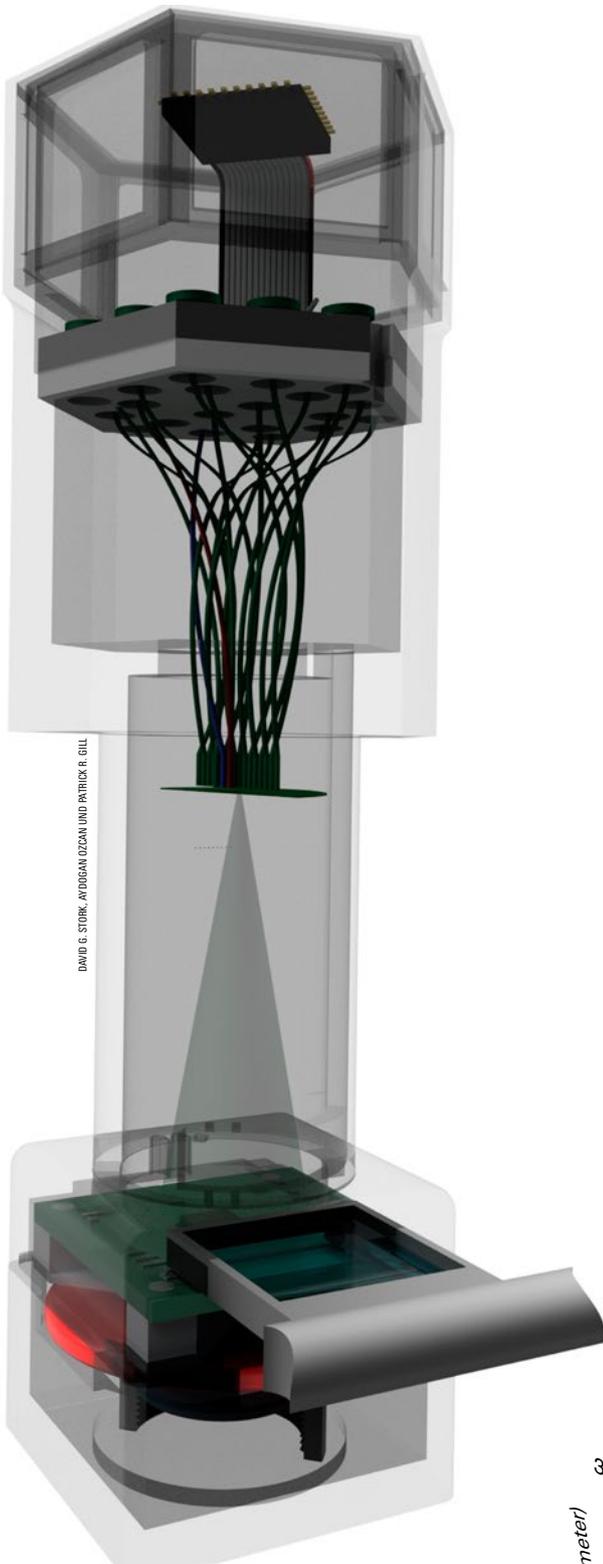
Was wäre eine entsprechende Basis für Bilder? Zwei der populärsten sind zweidimensionale Sinuswellen und »Wavelets« (**Spektrum** Juni 2017, S. 26). Diese Basiselemente sind mathematisch elegant – das heißt, es ist einfach mit ihnen zu rechnen – und dienen als Grundlage für vielfach verwendete Methoden der Bildkompression, wie JPEG.

Dabei nimmt ein Sensor ein Bild als kompliziertes Signal auf und ordnet jedem Pixel einen Zahlenwert zu; es

Das linsenlose Mikroskop erzeugt mehrere Interferenzbilder aus blauem, rotem und grünem LED-Licht (oben links), indem es die Lichtquelle oder die Probe verschiebt. Ein Phasen-Rekonstruktionsalgorithmus verarbeitet anschließend diese Daten und erstellt ein hoch aufgelöstes Bild für jede der drei Farben (unten links). Diese Aufnahmen werden dann zusammengefügt und führen zu einem farbigen Endergebnis (rechts). Hierbei handelt es sich um einen Zellabstrich eines Gebärmutterhalses.



DAVID G. STORIK, AYDOGAN OZCAN UND PATRICK R. GILL



Ein möglicher Aufbau eines linsenlosen Mikroskops benötigt 20 LEDs. Diese nehmen automatisch mehrere Interferenzbilder auf, die anschließend zu einem einzelnen digitalen Bild verarbeitet werden.

entsteht eine sehr lange Liste, die viel Speicherplatz in Anspruch nimmt. Die zweidimensionalen Sinuswellen und Wavelets entsprechen selbst auch Bildern; sie können ein beliebiges Motiv erzeugen, wenn man jedes mit einem passenden Faktor multipliziert und sie aufsummiert. Statt also jeden einzelnen Pixelwert eines Bilds zu speichern, sichert das Computerprogramm eine viel kürzere Liste der entsprechenden Faktoren, mit denen die Basiselemente multipliziert werden. Die transformierte Datei ist dadurch viel kleiner als das Bild selbst.

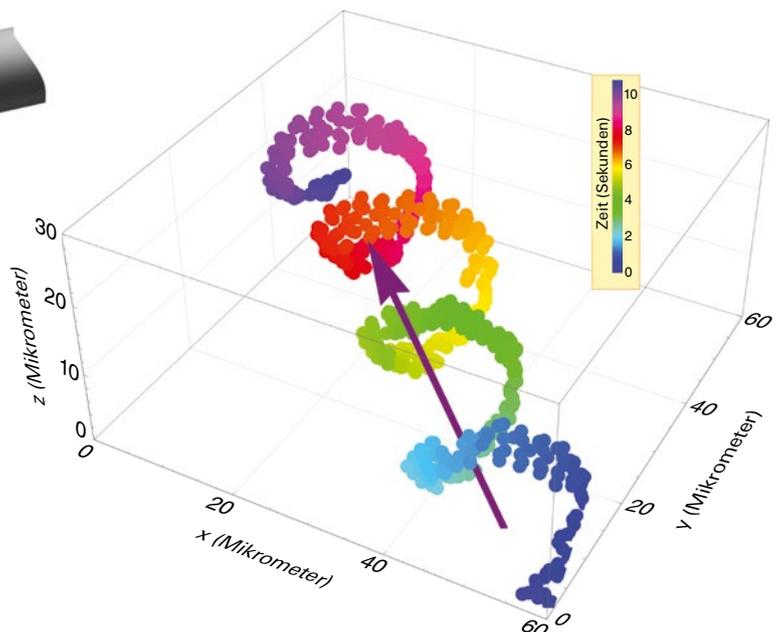
Bei den herkömmlichen Komprimierungsverfahren nimmt eine Kamera die gesamte Information auf, worauf eine Software diese verkleinert. Geräte zu entwerfen, die von vornherein lediglich die komprimierte Information aufnehmen, erwies sich als riesige Herausforderung.

Kamera ohne Linsen

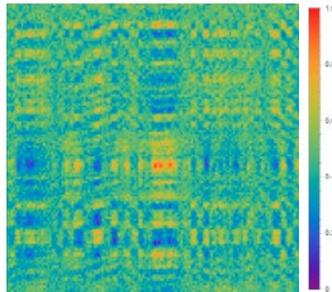
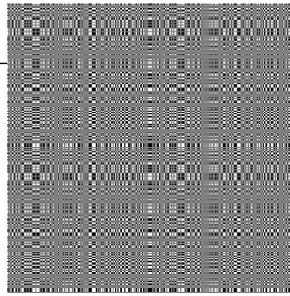
Das Problem lag bei den Basen: Zweidimensionale Sinuswellen und Wavelets eignen sich zwar zur digitalen Verarbeitung, aber nicht zum Aufnehmen des Signals. In der Praxis nutzt man Blenden, die aus undurchsichtigen und transparenten Bereichen bestehen und nur einen gewünschten Teil der Information einer Szene aufnehmen. Die kodierten Blenden führen bei der digitalen Verarbeitung aber zu so komplizierten Basen, dass es unmöglich ist, mit ihnen umzugehen.

Doch Anfang des Jahrtausends entwickelten die Mathematiker Terence Tao und Emmanuel Candès unabhängig voneinander das Verfahren des Compressive Sensing. Sie bewiesen, dass man komprimierbare Bilder mit einer beliebigen Basis aufnehmen kann, solange man weiß, dass sich die Information rein theoretisch auch in einer mathematisch eleganten Basis ausdrücken ließe, wie den

Ein linsenloses Mikroskop könnte genutzt werden, um die Bewegungen lebender Zellen (hier einer Spermazelle) in einem viel größeren Volumen zu verfolgen, als es bisher mit traditionellen Geräten möglich war.



Die dünnste Kamera der Welt



Bei der FlatCam passiert das Licht eines Objekts (hier eines Kuscheltiers) eine flache Blende. In der Mitte sind zwei Aufnahmen der gleichen Szene mit unterschiedlichen Blenden gezeigt. Ein Algorithmus, der auf Compressive Sensing basiert, bündelt alle Information und berechnet das einfachste Bild, das zu all diesen Daten passt (rechts). Je komplizierter das Objekt ist, desto mehr Bilder müssen dazu aufgenommen werden.

zuvor erwähnten Wavelets oder den zweidimensionalen Sinuswellen.

Ashok Veeraghavan und seinen Kollegen von der Rice University in Texas haben eine »FlatCam« entwickelt, die lediglich aus einer einfachen Blende besteht, die auf einem Bildsensor aufliegt (siehe »Die dünnste Kamera der Welt«, oben). Das Licht eines Objekts passiert die transparenten Bereiche der Blende und wird daran gebeugt, bevor es den Sensor erreicht.

Die FlatCam hat keine Linse, es wird also kein gewöhnliches Bild erzeugt. Das Fotodetektorfeld nimmt ein kompliziertes und scheinbar chaotisches Lichtmuster auf, in dem sich die Information der abgebildeten Szene verbirgt. Da der Sensor in jedem seiner Pixel ein Interferenzmuster des gesamten Bilds aufnimmt, stellt jedes dieser Pixel eine andere Messung dar. Mittels Compressive Sensing ermittelt ein Algorithmus das einfachste Motiv, das zu allen Messungen passt.

Diese neue Art Kamera bietet viele Vorteile: Da Herstellung und Einbau der Linsen teuer ist, kann sie wesentlich günstiger als herkömmliche Apparate produziert werden. Die FlatCam ist dünner als 0,5 Millimeter und wiegt lediglich 0,2 Gramm; sie eröffnet dadurch vollkommen neue Anwendungsgebiete. Selbst mit einem einzigen Schnappschuss erfasst sie alle nötigen Informationen, so dass sie auch dynamische Szenen in Echtzeit aufnehmen kann.

Neue Möglichkeiten in der Welt der Fotografie

Es beginnt eine neue Ära, in der bildgebende Verfahren die Physik des Lichts und der Materialien ausnutzen. Viele etablierte Methoden und Faustregeln, die technische Entwickler über Jahrhunderte begleitet haben, wurden mittl-

weile gestürzt; man braucht weder Linsen, gekrümmte Spiegel noch strukturierte Bildbasen, um ein Objekt abzubilden. Bilder sind in unserem Alltag so vertraut, dass es den meisten Menschen schwerfällt, sie als das zu betrachten, was sie wirklich sind: nämlich reine Information.

Bei der Entwicklung linsenloser Systeme wird in Zukunft die Herstellung anwendungsspezifischer Gitter und Computerprogramme eine wichtige Rolle spielen. Wenn man beispielsweise ein menschliches Gesicht aufnehmen möchte oder einen bestimmten Krankheitserreger detailliert untersuchen will, dann sollte das Beugungsgitter die dafür nötigen Informationen extrahieren.

Langfristig dürften die Entwickler so viele Aufgaben wie möglich von der digitalen Verarbeitung auf die technischen Geräte übertragen, um Rechenzeit und damit auch elektrische Leistung einzusparen. ◀

QUELLEN

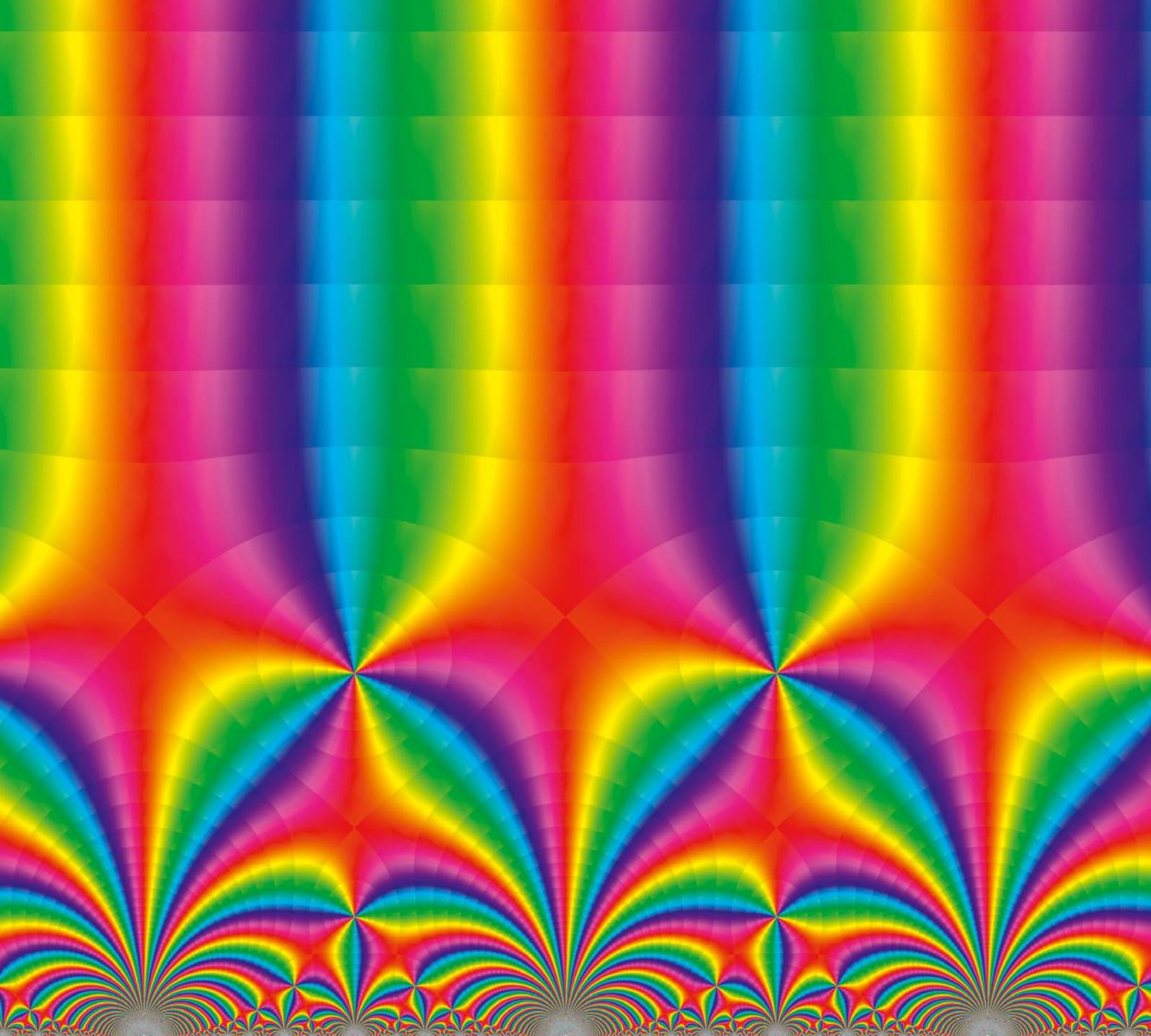
Asif, M. S. et al.: FlatCam: Thin, Lensless Cameras Using Coded Aperture and Computation. In: IEEE Transactions on Computational Imaging 3, S. 384–397, 2017

Cossairt, O. et al.: When Does Computational Imaging Improve Performance? In: IEEE Transactions on Image Processing 22, S. 447–458, 2013

Stork, D. G., Gill, P. R.: Optical, Mathematical and Computational Foundations of Lensless Ultra-Miniature Diffractive Imagers and Sensors. In: International Journal on Advances in Systems and Measurements 7, S. 201–208, 2014

Tseng, D. O. et al.: Lensfree Microscopy on a Cellphone. In: Lab on a Chip 10, S. 1787–1792, 2010

© American Scientist



MIT FRDL. GEN. VON ELIAS WEGERT, WWW.VISUALWEGERT.COM

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **KOMPLEXE SCHÖNHEITEN**

Kleinsche Invariante

Die j -Funktion ist der Endpunkt eines langen Wegs von der Zahlentheorie bis zur harmonischen Analyse (Spektrum Mai 2018, S. 70). Von besonderer Bedeutung sind ihre Symmetrien, die auch in diesem Phasenporträt zum Vorschein kommen: Verschiebung um die Länge 1 nach rechts oder links, Inversion am Einheitskreis und deren Zusammensetzungen.

Eine spezielle Darstellungsmethode für Funktionen einer komplexen Variablen ist das so genannte Phasenporträt. Hier demonstriert es ihre wesentlichen Eigenschaften in knallbunten Farben.



Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

» [spektrum.de/artikel/1573460](https://www.spektrum.de/artikel/1573460)

Angenommen, wir haben eine Funktion, durch eine Formel definiert wie zum Beispiel $y=f(x)=x^2-4x$ oder auch aus Messungen entstanden wie die Anzeige des Thermometers in unserem Vorgarten über den letzten Tag. Was tun wir, wenn wir mehr über sie wissen wollen?

Der naheliegendste Gedanke: Wir zeichnen sie in ein Koordinatensystem. Die horizontale x -Achse ist für die Werte der unabhängigen Variablen, die vertikale y -Achse für die der abhängigen Variablen, und jedes Zahlenpaar $(x, f(x))$ ergibt einen Punkt der Kurve. Das Verfahren ist so gewöhnlich, dass uns kaum noch in den Sinn kommt, wie ungeheuer nützlich es ist. Wir sehen mit einem Blick auf die Kurve, an welchen Stellen etwas Besonderes passiert: wo die Funktion maximal oder minimal wird oder wo $f(x)=0$ ist (eine »Nullstelle«), nämlich genau da, wo die Kurve die x -Achse kreuzt. Und da eine Nullstelle einer Funktion dasselbe ist wie eine Lösung der zugehörigen Gleichung, hat jeder, der eine Gleichung lösen möchte, ein besonderes Augenmerk auf Funktionen und ihre Nullstellen.

Alle Funktionen der Form $f(x)=x^2+ax+b$ mit irgendwelchen Konstanten a und b sehen eigentlich gleich aus – Normalparabeln eben. Und je nachdem, ob die Parabel ein Stück ins Negative taucht, auf der x -Achse aufsitzt oder über ihr schwebt, hat die zugehörige quadratische Gleichung zwei Lösungen, eine oder gar keine. Diese auszurechnen ist eine Arbeit für sich, die für kompliziertere Funktionen beliebig mühsam werden kann; aber hier soll es nur darum gehen, welchen globalen Eindruck man von einer Funktion auf den ersten Blick gewinnen kann.

Was für die üblichen Allerweltsfunktionen problemlos funktioniert, wird schwieriger, sobald nicht mehr die gewöhnlichen reellen, sondern die komplexen Zahlen im Spiel sind. Für deren Einführung gibt es allerdings gute Gründe. So haben manche quadratischen Gleichungen »eigentlich« keine Lösung, weil eine Wurzel aus einer negativen Zahl zu ziehen ist. Führt man aber eine neue Zahl namens i (die »imaginäre Einheit«) mit der Eigenschaft $i^2=-1$ ein und erkennt alle Ausdrücke der Form $a+bi$ mit reellen Zahlen a und b als Zahlen neuer Art an, die »komplexen Zahlen«, löst sich das Problem in Luft auf.

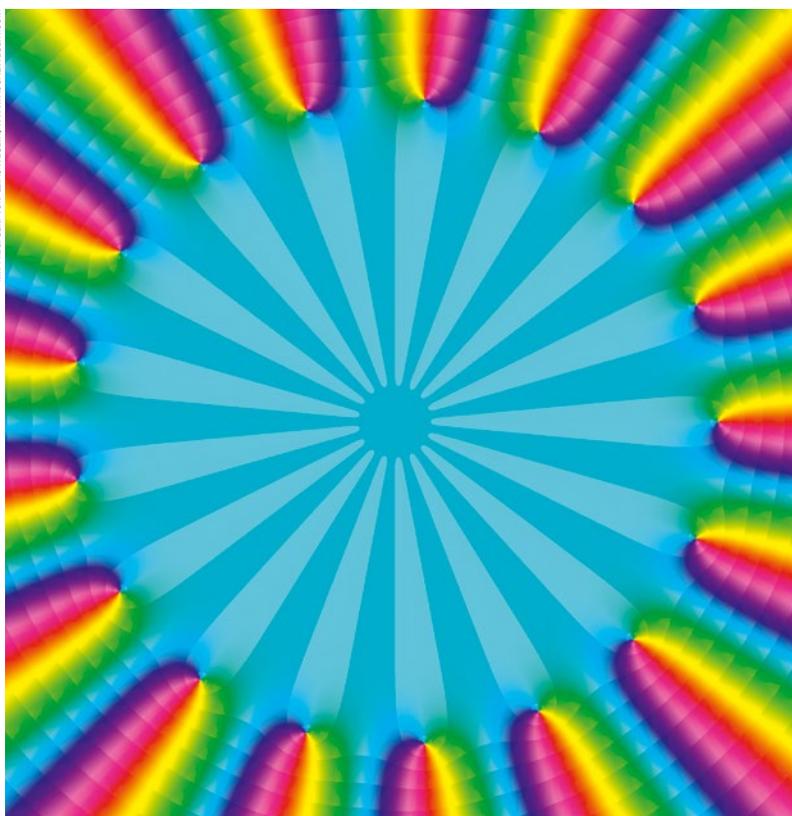
Die beiden Komponenten a und b einer komplexen Zahl $a+bi$ heißen Real- beziehungsweise Imaginärteil, und es ist zweckmäßig, sie mit dem Punkt (a, b) einer Ebene (der »komplexen Zahlenebene« oder auch »gaußschen Zahlenebene«) zu identifizieren. Damit benötigen die komplexen Zahlen zu ihrer Darstellung nicht nur eine eindimensionale Gerade wie die reellen, sondern zwei Dimensionen. Entsprechend würde die Darstellung einer komplexen Funktion vier Dimensionen in Anspruch nehmen – für uns dreidimensionale Wesen ein Ding der Unmöglichkeit.

Wer also ein anschauliches Bild einer komplexen Funktion produzieren will, muss gewisse Einschränkungen in Kauf nehmen. Denkbar wäre zum Beispiel, dass man zwar für die Werte der unabhängigen Variablen die ganze Ebene in Anspruch nimmt, aber von den Funktionswerten nur deren Abstand vom Nullpunkt, den »Betrag«, notiert. Bei komplexen Funktionen pflegt man die unabhängige Variable z statt x zu nennen und die abhängige w statt y . Man würde also zu jedem Punkt z der komplexen Ebene den Betrag $|w|=|f(z)|$ auftragen, und zwar als Höhe über dem Punkt z , was ein dreidimensionales Gebilde ergibt. Vor reichlich 100 Jahren hat man derlei noch aus Gips gefertigt, heute würde man sich mit einer Computerdarstellung begnügen, die aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten ist. Oder man kodiert die fehlende Dimension durch Farbe.

Kreisteilungspolynom

Phasenporträt der Funktion $f(z) = z^{17}-1$ in einer Umgebung des Nullpunkts. Nach dem Fundamentalsatz der Algebra hat jedes Polynom vom Grad n genau n Nullstellen in der komplexen Ebene (von denen mehrere in einem Punkt zusammenfallen dürfen: Mehrfachnullstellen). Die 17 Nullstellen dieses Polynoms bilden ein regelmäßiges Siebzehneck, dessen Ecken auf dem Einheitskreis liegen. Die Polynome der Form z^n-1 heißen daher auch Kreisteilungspolynome.

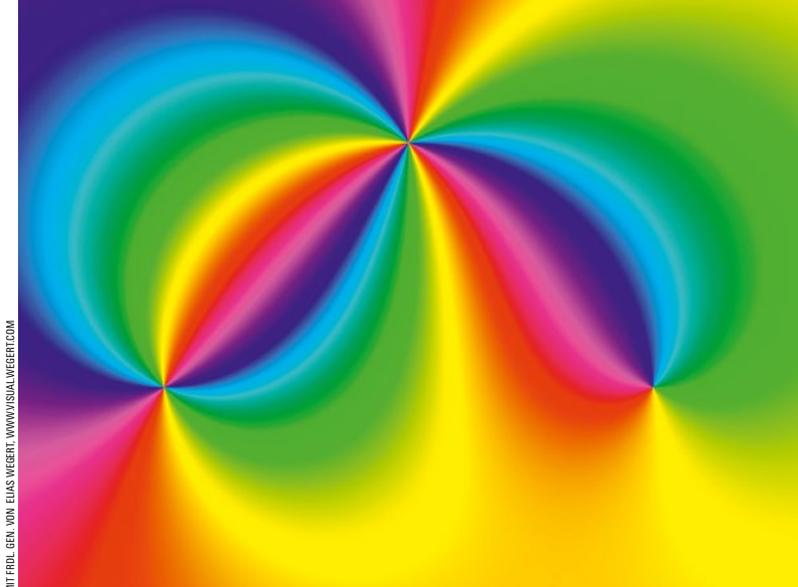
MIT FRIEDRICH VON ELIAS VIEBERT, WWW.VISUALVEBERT.COM



Die Bilder auf dieser und den folgenden Seiten kommen sogar mit zwei Dimensionen aus, passen also aufs Papier, ohne dass man irgendetwas perspektivisch abbilden müsste. Die dritte Dimension wird durch Farbe dargestellt und die vierte einfach ignoriert. Und zwar sehen wir von dem Funktionswert $f(z)$ im Punkt z der komplexen Ebene nicht den Betrag, sondern nur – farbkodiert – die so genannte Phase, definiert als $f(z)/|f(z)|$, Funktionswert geteilt durch dessen Betrag. Das ist der Punkt auf dem Einheitskreis (dem Kreis mit Mittelpunkt 0 und Radius 1), der vom Nullpunkt aus gesehen in derselben Richtung liegt wie der Funktionswert selbst. Entsprechend nennt man das so entstehende Bild ein Phasenporträt der Funktion.

Elias Wegert, Professor am Institut für angewandte Analysis der TU Bergakademie Freiberg (Sachsen), und sein Mitarbeiter Gunter Semmler haben dieses Darstellungsprinzip auf ein buntes Sortiment komplexer Funktionen angewandt. Seit 2011 bringen Wegert und Semmler jedes Jahr einen Kalender mit besonders ansehnlichen Exemplaren heraus; jene vergangener Jahre sind im Internet zu besichtigen. Mittlerweile sind auch Pamela Gorkin und Ulrich Daepf von der Bucknell University in Lewisburg (Pennsylvania) mit von der Partie.

Wie kann eine Darstellungsform, die einen wesentlichen Teil der Sache – den Betrag der Funktion – einfach weglässt, trotzdem etwas Brauchbares darüber aussagen? Das liegt im Wesentlichen daran, dass die Theorie der komplexen Funktionen – üblicherweise kurz und irreführend Funktionentheorie genannt – sich auf eine besondere Klasse von Funktionen zu konzentrieren pflegt. Sie heißen holomorph oder auch komplex-analytisch und verfügen über eine Fülle angenehmer Eigenschaften. Insbesondere sind sie »aus einem Guss« in dem Sinn, dass ihr Verhalten in einem Teil der komplexen Ebene ihre Gestalt im ganzen Rest bereits eindeutig festlegt. Eine Funktion aus verschiedenen Teilen irgendwie mehr oder weniger elegant zu-



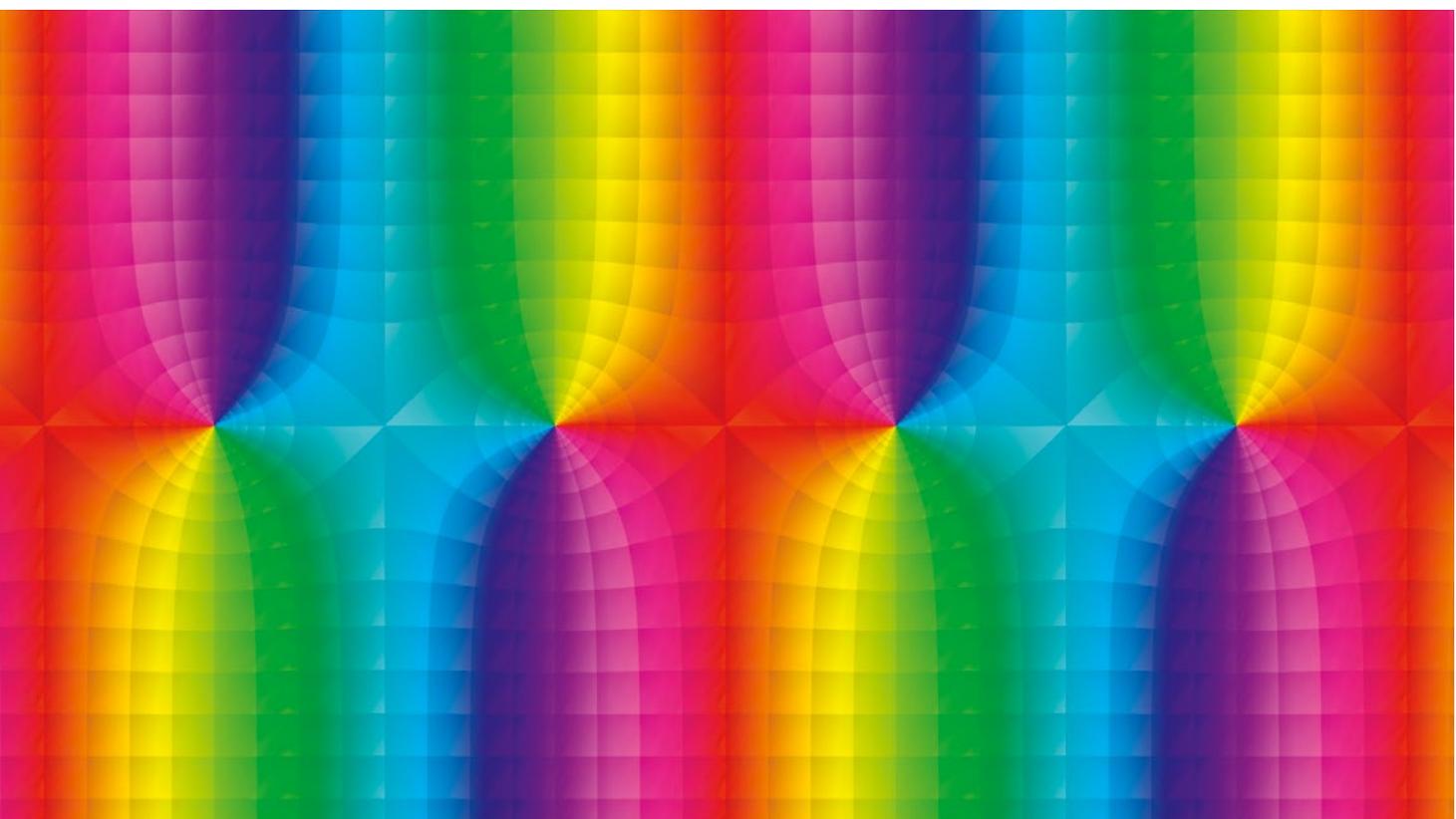
MIT FROL. GEN. VON ELIAS WEGERT, WWW.VISUAL.WEGERT.COM

Mehrfache Null- und Polstellen

Die Funktion $f(z) = (z-1)(z+1)^2/(z-i)^3$ hat die einfache Nullstelle 1 (rechts im Bild), die doppelte Nullstelle -1 (links) und einen dreifachen Pol im Punkt i (Mitte oben). Nullstellen und Pole kann man am Umlaufssinn der Farben unterscheiden: In der Umgebung einer Nullstelle folgen Grün, Gelb und Rot im Uhrzeigersinn aufeinander, bei einer Polstelle ist die Reihenfolge genau umgekehrt. Der Farbenkreis wird so oft durchlaufen, wie die Vielfachheit der Null- beziehungsweise Polstelle beträgt.

$$f(z) = \cos z$$

Phasenporträt der komplexen Kosinusfunktion in einem Rechteck mit Mittelpunkt im Nullpunkt. Für reelle Werte von z (horizontale Mittellinie) ist auch $\cos z$ reell; positive Werte sind rot, negative türkis gefärbt. Für große positive und negative Werte des Imaginärteils von z (weit oben beziehungsweise unten im Bild) strebt $|\cos z|$ so schnell gegen unendlich wie die Exponentialfunktion.



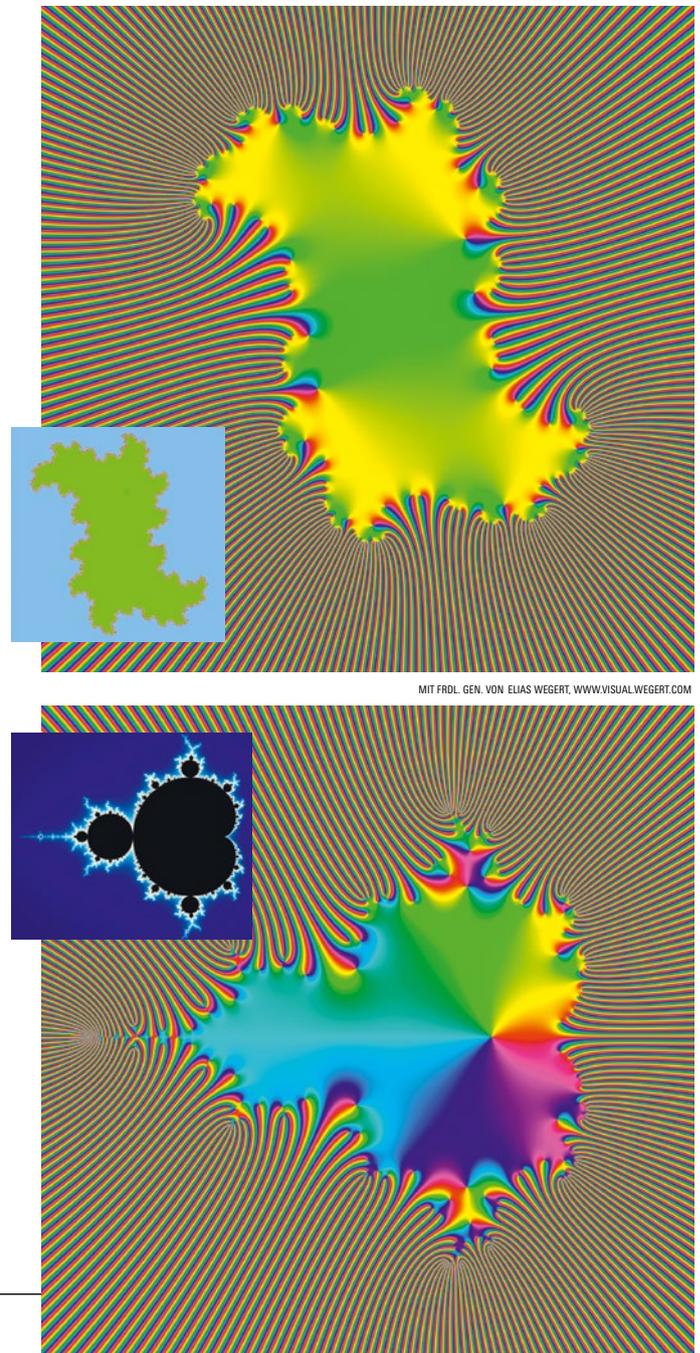
MIT FROL. GEN. VON ELIAS WEGERT, WWW.VISUAL.WEGERT.COM

rechtzstückeln – ein Standardverfahren für reelle Funktionen – funktioniert unter den komplex-analytischen Funktionen nicht. Vielmehr kann man aus dem Verhalten der Funktion in einem begrenzten Gebiet weit reichende Schlüsse auf den Rest der komplexen Ebene ziehen. Das geht so weit, dass das Phasenporträt einer holomorphen Funktion diese bereits eindeutig festlegt, bis auf einen positiven reellen Vergrößerungsfaktor.

Die Anforderungen, die an eine holomorphe Funktion gestellt werden, sind zwar äußerst streng; aber es gibt eine erstaunliche Vielfalt von Funktionen, die sie erfüllen, was die Funktionentheorie zu einem bedeutenden Teilgebiet der Mathematik macht. Alle Polynome gehören dazu, also alle Funktionen der Form $f(z) = a_0 + a_1z + a_2z^2 + \dots + a_nz^n$ mit komplexen Konstanten a_0, a_1, \dots, a_n . Und die Zahl n , die das obere Ende der Summe bezeichnet, darf beliebig groß sein. Sogar unendlich, in einem gewissen Sinn: Wenn die nicht abbrechende Summe (die »Potenzreihe«) $f(z) = a_0 + a_1z + a_2z^2 + a_3z^3 + \dots$ für jeden Wert von z konvergiert, das heißt einen endlichen Grenzwert hat, dann gehört f zur illustren Gesellschaft der komplex-analytischen Funktionen. Prominente Vertreter sind die Exponentialfunktion sowie die Winkelfunktionen Sinus und Kosinus, die aus der Perspektive der Funktionentheorie nichts weiter als Abkömmlinge der Exponentialfunktion sind. Entsprechend groß ist die Vielfalt der möglichen Phasenporträts.

Wer nun das Verhalten einer Funktion f in einem geeigneten Rechteck der komplexen Ebene porträtieren möchte, bedecke dieses Rechteck mit einem Gitter aus so vielen Punkten, wie hinterher das Bild Pixel haben soll, lasse den Computer für jeden Punkt z des Gitters den Wert $f(z)/|f(z)|$ berechnen und weise dem zugehörigen Pixel die entsprechende Farbe zu. Dafür hat man zuvor jedem Punkt des Einheitskreises eine Farbe gegeben, zweckmäßig so, dass benachbarte Punkte ähnliche Farben haben. Da bieten sich die Farben des Regenbogens an, zum Farbkreis geschlossen durch einen möglichst glatten Übergang von Violett nach Rot.

Was passiert, wenn f in einem der Gitterpunkte eine Nullstelle hat? Dort müsste der Computer $f(z)/|f(z)| = 0/0$

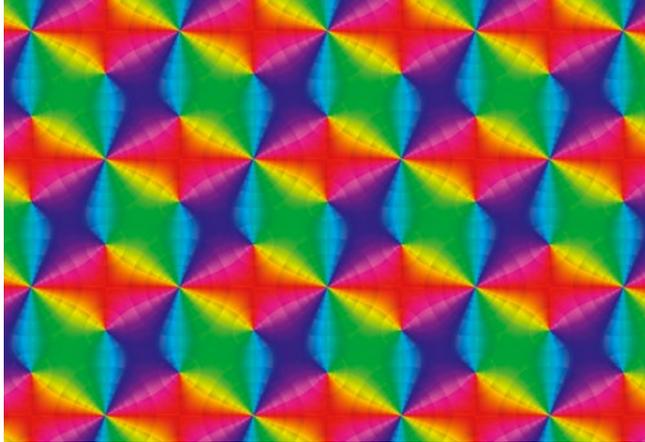


MIT FRODL. GEN. VON ELIAS WEGERT, WWW.VISUAL.WEGERT.COM

Klassische Fraktale

Zu den Paradebeispielen der fraktalen Geometrie (**Spektrum** September 1989, S. 52) zählen die so genannten Julia-Mengen. Man wende auf eine komplexe Zahl z die Abbildung $f(z) = z^2 + c$ mit einer komplexen Konstanten c an, auf das Ergebnis wieder dieselbe Abbildung, und so weiter bis ins Unendliche. Die (ausgefüllte) Julia-Menge zu c ist definiert als die Menge aller z , für welche die Folge der so berechneten Werte nicht ins Unendliche entschwindet. Es geht also um das Verhalten der Funktionenfolge $f(z) = z^2 + c$, $f(f(z)) = (z^2 + c)^2 + c$, $f(f(f(z))) \dots$ Im oberen Bild gezeigt ist das achte Glied dieser Folge für $c = 0,3 + 0,4i$. Es handelt sich um ein Polynom mit 256 Nullstellen; deren Lage zeichnet bereits ungefähr die fraktale Form der Julia-Menge (kleines Bild) nach.

Die berühmte Mandelbrot-Menge (das »Apfelmännchen«, kleines Bild im unteren Bild) ist die Menge aller komplexen Zahlen c , für welche die Folge $0, f(0), f(f(0)), \dots$ mit (wie oben) $f(z) = z^2 + c$ nicht gegen unendlich strebt. Auch dieser Menge kommt man durch eine Folge von Polynomen nahe. Sie ist rekursiv definiert durch $f_0(c) = c$, $f_n(c) = (f_{n-1}(c))^2 + c$. (Der Konsistenz zuliebe heißt hier die unabhängige Variable c statt z .) Das untere Bild zeigt im Phasenporträt das achte Glied f_8 dieser Funktionenfolge.



MIT FRDL. GEN. VON ELIAS WEGERT, WWW.VISUAL.WEGERT.COM

Die weierstraßsche \wp -Funktion

Eine unendliche Summe holomorpher Funktionen ist wieder holomorph – wenn die Summe in jedem Punkt konvergiert. Wenn man in jeden Knotenpunkt eines Parallelogrammgitters, das man über die komplexe Ebene legt, eine spezielle Funktion mit einem Pol zweiter Ordnung setzt und diese unendlich vielen Funktionen aufaddiert, erhält man die zum Gitter gehörige \wp -Funktion. Sie ist holomorph bis auf die Pole, die die einzelnen Summanden schon in die Summe mitgebracht haben, und doppelt periodisch, das Bild geht also in sich selbst über, wenn man es um eine Gittermasche in eine der beiden Richtungen verschiebt. Die nach Karl Weierstraß (1815–1897) benannte Funktion steht am Beginn eines langen Wegs, der zum Projekt einer großen Vereinheitlichung der Mathematik führt: dem Langlands-Programm (Spektrum Mai 2018, S. 70, und Juni 2018, S. 34).

ausrechnen – und weigert sich, zu Recht, denn $0/0$ ist nicht definiert. Diesen Fall muss der Programmierer gesondert behandeln und dem entsprechenden Pixel irgendeine Farbe geben. Es kommt nicht besonders darauf an, welche, denn das einzelne Pixel geht in seiner bunten Umgebung unter. Und diese Umgebung ist wirklich bunt! Wenn man in der z -Ebene auf einem kleinen Kreis um eine Nullstelle z_0 wandert, dann wandern die Funktionswerte $f(z)$ ebenfalls – ungefähr – auf einem Kreis, und zwar um den Nullpunkt, denn $f(z_0)$ ist ja gleich null: eine weitere Eigenschaft der holomorphen Funktionen. Also treffen in

Wesentliche Singularität

Die Funktion $f(z)=1/z$ hat an der Stelle $z=0$ nur einen Pol, das heißt, ihr Betrag geht gegen unendlich. Wendet man aber darauf die Exponentialfunktion an, dann verhält sich die so entstehende Funktion $g(z)=\exp(1/z)$ äußerst wild. Ihre Werte streben gegen unendlich, wenn man sich dem Nullpunkt von rechts (auf der reellen Achse) nähert, aber gegen 0, wenn man es von links tut. Solche weniger harmlosen Unendlichkeitsstellen nennt man wesentliche Singularitäten. Dort gerät die Funktion völlig außer Rand und Band: Sie nimmt in einer beliebig kleinen Umgebung jeden Wert – mit höchstens einer Ausnahme – unendlich oft an. Im Phasenporträt äußert sich das so, dass in einem kleinen Kreis um den Nullpunkt die Folge der Farben unendlich oft durchlaufen wird. Das könnte man noch besser sehen, wenn nicht in der Umgebung der Null wegen der absoluten Größe der Ergebnisse die Rundungsfehler überhandnehmen und eine Bildstörung verursachen würden.

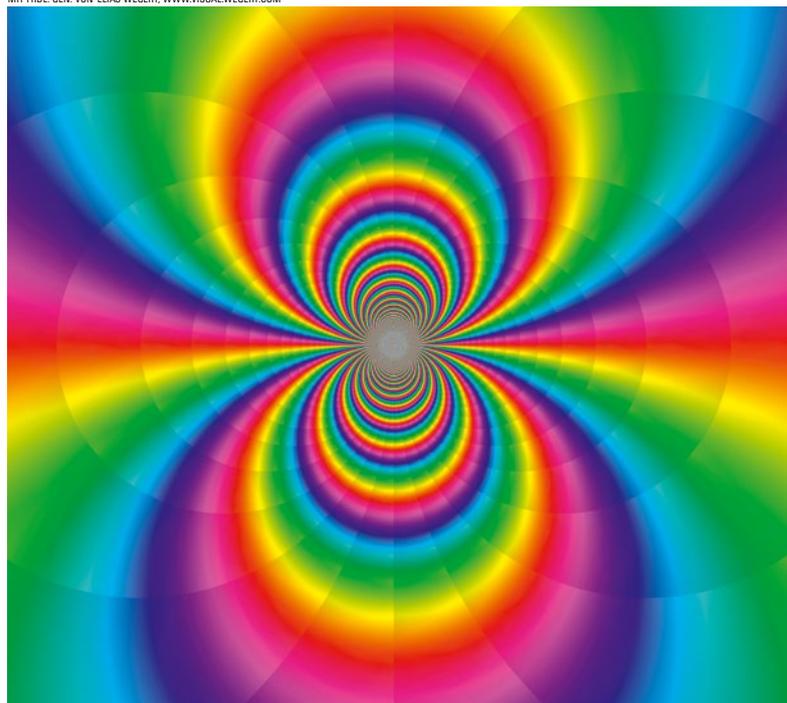
einer Nullstelle von f alle Farben des Farbenkreises zusammen, mit dem Effekt, dass diese Stellen im Phasenporträt dem Betrachter ins Auge springen (Bild S. 76, oben).

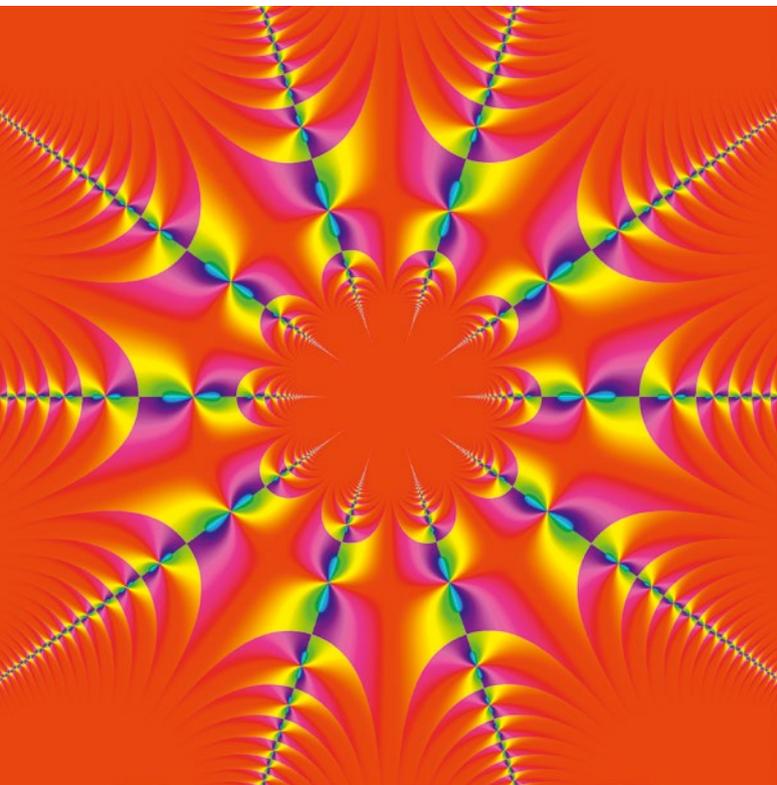
So streng die Funktionentheoretiker mit den Forderungen an ihre Objekte sind, so locker gehen sie mit deren gelegentlichen Ausbrüchen ins Unendliche um – wesentlich entspannter als die Kollegen aus der reellen Analysis. Welchen Wert hat die Funktion $f(x)=1/x$ im Punkt $x=0$? Den gibt's nicht. Wer sich dem Nullpunkt von rechts nähert, könnte auf die Idee kommen, $f(0)$ sei so etwas wie plus unendlich; aber wer sich von links anschleicht, kommt mit demselben Recht zu dem Ergebnis minus unendlich, und gegen diesen Widerspruch hilft kein willkürliches Definieren.

Im Komplexen ist die Sache auf den ersten Blick noch schlimmer. Man kann aus lauter verschiedenen Richtungen auf den Punkt $z=0$ zulaufen, und in ebenso vielen Richtungen strebt $1/z$ ins Unendliche. Aber die Funktionentheoretiker haben kein Problem damit, diese vielen verschiedenen Unendlichkeiten in einen Punkt zusammenzufassen. Sie setzen auf den Nullpunkt der komplexen Ebene eine (Erd-)Kugel und betrachten an Stelle eines Punkts z der Ebene jenen Punkt der Kugeloberfläche, den die Gerade durch z und den Nordpol der Kugel durchstößt. Je weiter draußen der Punkt der Ebene, desto nördlicher liegt sein Bild auf der Kugel, und der Nordpol selbst entspricht allen unendlich fernen Punkten (»stereografische Projektion«, siehe auch Spektrum Januar 2008, S. 72).

Wenn nun eine im Übrigen holomorphe Funktion nach Art von $f(z)=1/z$ an einem Punkt gegen unendlich strebt, sieht das auf der Kugel relativ harmlos aus. Mehr noch: Man kann die Kugel ein bisschen rollen und damit das Unendliche sozusagen ins Endliche schieben, ohne an der Gesamtsituation etwas Wesentliches zu ändern. Im Phasenporträt gilt für eine solche Unendlichkeitsstelle (eine »Polstelle«) bemerkenswerterweise dasselbe wie für eine Nullstelle: Dort treffen sich alle Farben, weil die Funktionswerte in allen Richtungen ins Unendliche laufen. Und davon, dass die Beträge immer größer werden, merkt das Phasenporträt nichts, denn der Funktionswert $f(z)$ wird ja

MIT FRDL. GEN. VON ELIAS WEGERT, WWW.VISUAL.WEGERT.COM





MIT FRODL. GEN. VON ELIAS WEGERT, WWW.VISUAL.WEGERT.COM

Komplexer Logarithmus

Eine komplex-analytische Funktion ist durch ihre Werte in einem kleinen Gebiet bereits so festgelegt, dass man sie über dieses Gebiet hinaus eindeutig fortsetzen kann – im Prinzip. Dabei kann es jedoch Konflikte geben, wenn verschiedene Fortsetzungen nicht zusammenpassen. Beispielsweise kann es einen Unterschied machen, ob man rechts oder links an einer Singularität vorbei in neue Gebiete vordringt. In diesem Fall nennt man die Singularität einen Verzweigungspunkt. Klassisches Beispiel ist die Umkehrung der komplexen Exponentialfunktion, der Logarithmus: Er hat einen Verzweigungspunkt im Nullpunkt. Üblicherweise entledigt man sich der Mehrdeutigkeit, indem man dem Logarithmus ober- und unterhalb der negativen reellen Achse verschiedene Werte zuweist und damit dort (eigentlich nicht erlaubte) Unstetigkeiten in Kauf nimmt. Im Phasenporträt führen diese zu abrupten Farbwechsellern. Das Bild zeigt nicht die Logarithmusfunktion selbst, sondern aus ästhetischen Gründen eine Zusammensetzung, an der der Logarithmus beteiligt ist: $f(z) = \log \cos(z^5 - z^{-5})$.

immer durch $|f(z)|$ dividiert. Die Klasse der Funktionen, die bis auf eine oder mehrere Polstellen holomorph sind, ist bedeutend genug, um einen eigenen Namen zu bekommen: meromorphe Funktionen.

Nun ist zwar der Betrag der Funktionswerte entbehrlich in dem Sinn, dass das Phasenporträt bereits alles Wesentliche über eine holo- oder meromorphe Funktion sagt; aber so ungefähr möchte man ihn vielleicht trotzdem ablesen können. Das lässt sich machen, denn der Farbkreis schöpft das Sortiment der darstellbaren Nuancen bei Weitem nicht aus. Da bleiben noch reichlich Farbtöne übrig, um weitere Informationen unterzubringen.

Wegert und Semmler nutzen diese Möglichkeiten, indem sie die Farbe des jeweiligen Pixels mit zunehmendem Betrag allmählich abdunkeln – aber nur bis zu einem bestimmten Wert des Betrags, sagen wir 1. Ab da werden die Farben plötzlich wieder hell und dunkeln nach bis zum Betrag 2, der nächste Übergang von hell nach dunkel erstreckt sich von 2 nach 4, dann von 4 nach 8 und so weiter in Zweierpotenzen. Für den Betrachter erscheinen dadurch im Bild Linien gleichen Betrags (»Höhenlinien«) in einer logarithmischen Skala.

Eine ähnliche Skala erstellen Wegert und Semmler für die Phase, indem sie die Farben des Farbkreises nach demselben Muster immer wieder plötzlich hell und allmählich dunkel machen, und das über den ganzen Kreis hinweg vielleicht 20-mal. Das liefert zwar streng genommen keine neue Information – die Phase wird ja durch den unverdunkelten Farbton bereits repräsentiert –, aber der Farbkreis bekommt dadurch so etwas wie eine Einteilung in gleiche Abschnitte, und es ist einfacher, Linien konstanter Phase (beziehungsweise konstanter Farbe) mit

den Augen zu verfolgen. Zusammen legen die Höhenlinien beider Arten eine Art verzerrtes Gradnetz über das gesamte Bild, wodurch die Struktur des Phasenporträts deutlicher zu Tage tritt. In jedem Knoten des Netzes stehen die Linien beider Arten senkrecht aufeinander – ein Effekt, der sich ebenfalls über die Funktionentheorie erklären lässt.

Über die hier gezeigten Bilder hinaus hat die Funktionentheorie noch viel mehr zu bieten. Erstaunlich viele mathematische Gegenstände lassen sich durch holo- oder meromorphe Funktionen beschreiben, darunter die berühmte riemannsche Zetafunktion, die selbst meromorph ist und deren Nullstellen Auskunft über die Verteilung der Primzahlen geben (*Spektrum* September 2008, S. 86), aber auch scheinbar weit entfernte Themen wie die Collatz-Folge (*Spektrum* Februar 2014, S. 72) oder die chemische Musterbildung (*Spektrum* Mai 1983, S. 98). Sie alle – und noch mehr – haben einen Platz in Wegerts und Semmlers Bildergalerie gefunden. ◀

QUELLEN

Wegert, E., Semmler, G.: Phase Plots of Complex Functions: A Journey in Illustration. In: Notices of the AMS 58, S. 768–780, 2011. Online unter <http://www.ams.org/journals/notices/201106/rtx110600768p.pdf>

Wegert, E.: Visual Complex Functions. An Introduction with Phase Portraits. Birkhäuser, Basel 2012

Wegert, E.: Visual Explorations of Complex Functions. In: Qian, T., Rodino, L. (Hg.): Mathematical Analysis, Probability and Applications. Plenary Lectures, ISAAC 2015, Macau, China. Springer, Heidelberg 2016, S. 253–279

WEBLINKS

Alle bisher erschienenen Kalender zum Download: www.mathe-kalender.de

Elias Wegerts Website zum Thema: www.visual.wegert.com/

ERLEBEN SIE DEN ZAUBER DES NORDLICHTS

SEIT JEHER begeistern die eindrucksvollen Nordlichter all jene, die dieses einzigartige Naturphänomen zu sehen bekommen. Wie fantastische Lichtgemälde erhellen zarte Schleier die tiefdunkle Winternacht. Erleben Sie die Faszination des Sternen- und Polarhimmels mit seinen Farben und Lichtern im nordischen Winter. Begleitet wird diese Themenreise von unserem Experten Dr. Beat Fischer. Seine große Leidenschaft ist die Astronomie und deren Sternbilder. Gemeinsame Beobachtungen und Erläuterungen am nächtlichen Himmel gehören zu den Highlights auf dieser Schiffsreise. Lassen Sie sich von den arktischen Nächten verzaubern.

FÜR UNSERE LESERINNEN UND LESER haben wir eine nordwärts gehende und eine südwärts gehende Reise aus dem Hürtigruten-Programm ausgewählt. Diese werden mit Glur Reisen in Basel durchgeführt. **Abonnenten erhalten für sich und eine weitere Person bei der Buchung einen Nachlass auf den Reisepreis.** Die Reise wird ab und bis Zürich begleitet; andere Abflughäfen sind auf Anfrage buchbar.

Weitere Informationen und Buchung:

[Spektrum.de/plus](https://www.spektrum.de/plus)

Spektrum PLUS+

GLUR
REISEN

 HÜRTIGRUTEN



FREISTETTERS FORMELWELT HANDWERK UND HOHE KUNST

Das eine ist bloß die Umkehrung vom anderen; aber Differenzieren ist Anwenden von Regeln, Integrieren dagegen erfordert häufig Kreativität. Beides gehört zur Mathematik.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«. [» spektrum.de/artikel/1573482](http://spektrum.de/artikel/1573482)

In der Schule war ich nie gut in Mathematik. Das hat sich erst während meines Studiums geändert. Besonders aber mochte ich, in der Schule wie an der Uni, die Differenzialrechnung. Die Ableitung einer mathematischen Funktion zu berechnen (sie zu »differenzieren«), empfinde ich noch heute als beruhigend. Dabei kommt es mir nicht so sehr darauf an, was das Ergebnis bedeutet – die Veränderungsrate einer mathematischen Funktion –, sondern auf die Tätigkeit an sich: Eine Funktion zu differenzieren, ist auf ähnliche Weise befriedigend, wie ein Holzregal zusammenzubauen, einen Schal zu stricken oder Unkraut zu jäten. Und der Vergleich ist gar nicht so weit hergeholt.

Zum Differenzieren braucht es kaum Kreativität, Intuition oder tiefere Einsicht in die mathematischen Vorgänge. Wenn man einen kleinen Satz an Regeln beherrscht, kann man jede Funktion ableiten, die überhaupt eine Ableitung hat. Und die entsprechenden Vorschriften habe ich bis heute nicht vergessen. Zum Beispiel die Quotientenregel:

$$\left(\frac{f(x)}{g(x)}\right)' = \frac{f'(x)g(x) - f(x)g'(x)}{g(x)^2}$$

Zwei Funktionen, von denen eine durch die andere geteilt wird, lassen sich mit dieser Regel einfach differenzieren. Außerdem gibt es eine Produktregel, eine Kettenregel und noch ein paar weitere Gesetzmäßigkeiten. Solange man nicht den Überblick über die Formeln und Symbole verliert, ist das Differenzieren sehr komplizierter Ausdrücke kein Problem.

Darin unterscheidet sich die Differenzialrechnung deutlich von ihrem mathematischen Gegenstück, der Integralrechnung: Zu einer gegebenen Funktion g sucht man die Funktion f , deren Ableitung g ist. Auch hier existieren Regeln, und es gibt ein paar Standardmethoden, mit denen man das Integral einfacher Funktionen berechnen kann. Doch während sich das Differenzieren als reines Handwerk beschreiben lässt, ist das Integrieren eher mit Kunst zu vergleichen. Das

Integral einer komplizierten Funktion als Formel auszudrücken, mag unmöglich erscheinen und ist es manchmal auch. Aber dann hat man plötzlich einen kreativen Einfall, der verborgene Muster oder bisher unentdeckte Zusammenhänge offenlegt, die den Einsatz bekannter Integrationstechniken erlauben.

Man kann ganze Dissertationen oder gar wissenschaftliche Karrieren mit der Berechnung mathematischer Integrale verbringen. Das Differenzieren erledigt dagegen heutzutage jedes bessere Computeralgebrasystem. Während meines Studiums und später in meiner Arbeit als Astronom musste ich immer wieder Integrale berechnen. Wenn mir das gelang, war es jedes Mal ein besonders befriedigendes und eindruckliches Erlebnis. Oft brütete ich allerdings auch stundenlang ohne Fortschritt über den Formeln. Und entweder brachte irgendwann ein plötzlicher Geistesblitz endlich den Durchbruch – oder ich musste mich geschlagen geben, und das Problem blieb ungelöst.

Beim Differenzieren dagegen wusste ich stets, woran ich war. Das Problem mochte äußerst unübersichtlich erscheinen; wenn ich jedoch konzentriert an die Arbeit ging, den mathematischen Ausdruck in seine Bestandteile zerlegte und die passenden Ableitungsregeln eine nach der anderen anwandte, war der Erfolg nur eine Frage der Zeit.

Wann immer ich während meiner Arbeit etwas zu differenzieren hatte, habe ich versucht, die Sache ohne Hilfe von Computern zu erledigen – auch wenn es dann oft ein wenig länger gedauert hat. Aber es ist ja auch sehr oft schöner, zu Fuß von A nach B zu gehen, obwohl man mit dem Auto viel schneller wäre.

Die Mathematik braucht das Handwerk genauso wie die Kunst. Und wer sich sich auf den »Fußweg« durch die Gleichungen macht, lernt unterwegs nicht nur dieses Handwerk, sondern erarbeitet sich zudem die nötige Ausdauer, um die wirklich schweren Probleme angehen zu können.

GESCHICHTE WAR DER DREISSIGJÄHRIGE KRIEG EUROPÄISCH?

Was als Aufstand in Böhmen begann, erfasste nicht nur das Heilige Römische Reich Deutscher Nation, sondern auch etliche Nachbarstaaten. Doch eine einfache Antwort auf die Frage gibt es nicht.



Georg Schmidt lehrte bis 2017 Geschichte der Frühen Neuzeit an der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

» spektrum.de/artikel/1545925

»EUROPA QUERULA ET VULNERATA«, »Klage der Europa« ist dieses Flugblatt von 1631 betitelt. Das mythische Sinnbild für den vom Krieg heimgesuchten Kontinent sei nämlich, so führte ein Text weiter aus, »an ihren Gliedern und ganzem Leibe verletzt und verwundet«, so dass sie »Trost und Hülfe begehret«. Die Radierung verdeutlicht ihre Situation: Europa wird von Soldaten mit Pfeilen beschossen, während eine Gruppe von Männern im linken Bildteil in eine Diskussion vertieft ist.



ANNETTE KRÄUSCH / GERMANISCHES NATIONALMUSEUM, GRAFISCHE SAMMLUNG ANDREAS BRETSCHNEIDER, EUROPA QUERULA ET VULNERATA, 1631, INV.-NR. HB 4751



SERIE

Der Dreißigjährige Krieg

Teil 1: Juni 2018

**Wie kam es zum
Dreißigjährigen Krieg?**
Axel Gotthard

Chronologie des Kriegs
Daniel Carlo Pangerl

Teil 2: Juli 2018

So lebten und starben die Söldner
Sabine Eickhoff

Teil 3: August 2018

War der Dreißigjährige Krieg europäisch?
Georg Schmidt

ANNETTE KRAUSCH / GERMANISCHES NATIONALMUSEUM, GRAVISCHES SAMMLUNG (ANDRÉAS BRETSCHNEIDER, EUROPA QUERELA ET VULNERATA, 1631, INV.-NR. AB 975)

Der Dreißigjährige Krieg begann 1618 als Rebellion der böhmischen Stände und endete 1648 mit dem Vertragswerk des Westfälischen Friedens, das künftig als »ewiges Verfassungsgesetz« zu den Grundgesetzen des Heiligen Römischen Reichs Deutscher Nation gehörte. Er gilt zu Recht als Krieg um die deutsche Freiheit, das heißt gegen Alleinherrschaft und Despotismus, für die Machtteilung und die Gleichberechtigung des evangelischen Glaubens in Deutschland. Doch weil auch diverse Nachbarstaaten involviert waren, ist in jüngerer Zeit mitunter von einem europäischen Krieg die Rede. Irrten also die Zeitgenossen, wenn sie von einem deutschen Dreißigjährigen Krieg sprachen? Zwar lässt sich diese Frage keineswegs klar beantworten, doch spricht vieles gegen die Europäisierung.

Europa setzte sich um 1600 aus mehr oder weniger selbstständigen, sich untereinander beargwöhnenden Staaten, Herrschaften und Republiken zusammen. Kriege waren die Fortsetzung der Politik mit anderen Mitteln. Sie richteten sich in Italien und den Niederlanden, in Katalonien und Portugal gegen die spanische Fremdherrschaft. In England suchte das Land seine Freiheit vom Londoner Königshof; in Frankreich rebellierte die evangelischen Hugenotten gegen den katholischen Glaubenszwang und der über das Land verteilte Adel gegen die absolute Macht des Königtums. Die Schweden kämpften um die Vorherrschaft im Ostseeraum, besiegten Russen und Polen, rangen mit den Dänen und griffen in den Krieg in Deutschland ein. Dänen, Schweden und Franzosen intervenierten aber auch deshalb, weil sie sich angesichts der Siege Kaiser Ferdinands II. (1578–1637) und der katholischen Ligaarmee gefährdet sahen. Wenn der Kaiser die Mitte Europas allein beherrschte, verbündet mit dem spanischen König – beide Habsburger –, war er der Hegemon des Kontinents. Noch unfertige Staaten, so die Erkenntnis des Augsburger Historiker Johannes Burkhardt, rangen in jener Zeit um Stabilität und Anerkennung.

Dabei waren die allgegenwärtigen Krisen und Kriege den Zeitgenossen durchaus bewusst. Nicht wenige Gelehrte suchten nach Lösungskonzepten. Der Dominikaner Tommaso Campanella (1568–1639) empfahl beispielsweise

se, die Oberherrschaft den Spaniern als der damals stärksten Macht zu übertragen. Maximilien Duc de Sully (1566–1641) befürwortete die Bildung von 15 Staaten, die sich im Gleichgewicht halten würden; dabei sollten die Habsburger nur in Spanien herrschen. Dies schwebte auch Bogislaw von Chemnitz (1605–1678) vor, der unter dem Pseudonym Hippolithus a Lapide in den 1640er Jahren riet, die Habsburger aus dem Reich zu vertreiben, weil sie es beherrschen wollten. Nach Émeric Crucé (1590–1648) sollten die europäischen Herrscher gemeinsam in einem großen Rat über Krieg und Frieden entscheiden. Sie alle unterschätzten allerdings die beiden Größen, die damals die internationalen Beziehungen prägten: die Souveränität, also die unteilbare und höchste Herrschaftsgewalt sowie die Staatsräson, der absolute Vorrang der Interessen eines Gemeinwesens.

Nicht nur politisch, auch kulturell bildete Europa zu Beginn der Frühen Neuzeit keineswegs eine Einheit. In lateinischer Sprache miteinander kommunizierende Eliten betonten nationale Unterschiede, die das gemeinsame antike Erbe überlagerten. Eine der größten Errungenschaften jener Vergangenheit, das römische Recht, galt nur in den romanischen Ländern, ansonsten hilfsweise oder gar nicht. Zudem war die abendländische Christenheit als Folge der Reformation in vier sich erbittert bekämpfende große Konfessionen gespalten: Katholiken, Lutheraner, Calvinisten und die Anglikaner auf der Britischen Insel. Die Aufrufe zum Türkenkrieg, zum gemeinsamen Kampf gegen den muslimischen Erbfeind, zeigten angesichts der inneren Konflikte nur wenig Wirkung.

Glaubenskonflikt oder allgemeine Krise?

Der eigene Glaube mobilisierte allerdings die Massen gegen die anderen christlichen Konfessionen. Er wurde aber als Kriegsmotiv häufig nur vorgeschoben. Tatsächlich kämpften oft Herrscher und Staaten gleicher Konfession gegeneinander, wie die Kriege zwischen Spanien und Frankreich, den österreichischen Habsburgern und Venedig, Savoyen und Spanien oder zwischen Schweden und Dänemark zeigen. Die angelsächsische Forschung spricht deshalb seit den 1950er Jahren von der »allgemeinen Krise des 17. Jahrhunderts«. Vor dieser Folie entstand das Deutungsmuster eines europäischen Dreißigjährigen Kriegs, obwohl der bewaffnete Konflikt zwischen Spaniern und Franzosen 1618 noch nicht begonnen hatte und erst 1659 endete.

Die Zeitgenossen sprachen dagegen trotz des Beginns in Böhmen stets von einem deutschen Krieg. Als sich Ferdinand II. anschickte, nach der Schlacht am Weißen Berg dort ein frühabsolutistisches und gegenreformatorisches Königtum zu errichten, warfen ihm seine Gegner vor, auch den »Meister von Deutschland« spielen und die deutsche Freiheit, nämlich das Mitregiment der Reichsstände, liquidieren zu wollen. Als wollte er diese Vorwürfe sogar noch bestätigen, übertrug der Kaiser, der laut Reichsrecht dazu nicht befugt war, dem mit ihm verbündeten Herzog Maximilian von Bayern die Pfälzer Kurwürde sowie die Herrschaft in der Oberpfalz und in der rechtsrheinischen Kurpfalz.

AUF EINEN BLICK WIDER KAISERLICHE DOMINANZ

- 1** Den Zeitgenossen galten die Kampfhandlungen, die zwischen 1618 und 1648 in Mitteleuropa ausgetragen wurden, als ein deutscher Krieg.
- 2** Allerdings waren etliche Staaten des Kontinents involviert, weshalb Historiker Ende des 20. Jahrhunderts auch von einem europäischen Krieg sprachen.
- 3** Letztlich war das Hauptziel der Interventionen aber, eine Dominanz des Kaisers im Reich und damit auch in Europa zu verhindern.

Seine Gegner warfen dem Kaiser vor, den »Meister von Deutschland« zu spielen

Als die Ligaarmee weiter nach Norden vorstieß, rief dies erstmals mit König Christian IV. von Dänemark (1577–1648) eine ausländische Macht auf den Plan. Doch die kaiserliche Armee unter Albrecht von Wallenstein (1583–1634) verdrängte die Dänen vom Festland. Mit dem Restitutionsedikt von März 1629, das zu Gunsten der Katholiken massiv in die Reichs- und Religionsverfassung eingriff, dehnte der von katholischen Fanatikern beeinflusste, nach noch mehr Macht gierende Kaiser wie schon bei der Kurübertragung seine Befugnisse weit über Gebühr aus. Er trieb die Protestanten in die Arme der Schweden, die im Sommer 1630 auf Usedom gelandet waren. Gustav II. Adolf von Schweden (1594–1632) wollte verhindern, dass sich mit Ferdinand II. und seinem Feldherrn Wallenstein eine starke Macht an der deutschen Ostseeküste festsetzte. Die evangelische Publizistik in Deutschland stilisierte ihn hingegen als Werkzeug Gottes im Kampf gegen den im Papst verkörperten Antichristen. Gustav II. Adolf befreite die deutschen Protestanten tatsächlich aus ihrer ärgsten Not, fiel aber 1632 in der Schlacht bei Lützen. Schweden kämpfte danach im Wesentlichen um territoriale und finanzielle Entschädigungen.

An dessen Seite griff Frankreich 1635 in das Kriegsgeschehen ein, eine Folge seines Konflikts mit dem habsburgischen Spanien. Dabei hatten der Kaiser und die Reichsstände gerade im Prager Frieden vereinbart, nicht mehr die Waffen gegeneinander zu führen. So aber ging das Ringen weiter und der angebliche Glaubenskrieg verlor endgültig seine Glaubwürdigkeit. Bis zum Westfälischen Frieden 1648 konnte freilich niemand den Sieg erringen, der es ermöglicht hätte, dem Gegner die Bedingungen zu diktieren.

Der Friedensvertrag von Münster und Osnabrück entsprach den Sicherheitsbedürfnissen der deutschen Stände und der europäischen Mächte. Als Reichsgrundgesetz modifizierte er den verfassungsrechtlichen Zustand vor dem Krieg. Er schrieb die reichsständischen Mitbestimmungsrechte, die Konfessionsverhältnisse und mit ihnen auch Diskriminierungsverbote fest, die zum Wurzelwerk der Menschen- und Bürgerrechte gehören. Die drei Garantiemächte – der Kaiser sowie die Herrscher Frankreichs und Schwedens – zeichneten dafür verantwortlich, dass die inneren Verhältnisse im Heiligen Römischen Reich Deutscher Nation nur im Konsens verändert werden konnten. Es entstand ein komplexes Mehrebenengefüge, das der heutigen Europäischen Union ähnelt. Es war nur handlungsfähig, wenn sich Kaiser und Reichsstände einig waren.

Mit den Verträgen wurde 1648 die von der niederländischen Republik in einem eigenen Vertragswerk erreichte staatliche Souveränität ebenso anerkannt wie diejenige

Basels und der Eidgenossenschaft. Frankreich erhielt die habsburgischen Gebiete im Elsass sowie die Bistümer Toul, Metz und Verdun; diese waren schon seit fast 100 Jahren in französischem Besitz, was nun offiziell anerkannt wurde. Die fortan von Schweden beherrschten Küstenregionen – insbesondere Vorpommern und Bremen – verblieben im Reichsverband.

Der Befund ist demnach hinsichtlich der Frage, ob es nicht doch ein europäischer Krieg war, uneindeutig. Die magischen Zahlen 1618 und 1648, die Ursachen des Gemetzels und das Schlachtfeld verweisen auf einen mittel-europäischen beziehungsweise deutschen Krieg. Die dazu parallelen Kriege besitzen ihre eigenen Motive. In Dänemark, im Baltikum, im Veltlin, in den Niederlanden, auf der italienischen und spanischen Halbinsel oder auch in Lothringen und im Burgund wurde jedenfalls nicht primär um die Reichs- und Religionsverfassung, den Vollzug des Restitutionsediktes oder des Prager Friedens gekämpft.

Kampf um den Nationalstaat

Eine gemeinsame europäische Erinnerung an den Dreißigjährigen Krieg gibt es deshalb nicht. In Frankreich gilt diese Zeit als Beginn nationaler Größe, England erinnert sich seiner republikanischen Revolution. Christian IV. steht in Dänemark für imperiale Ambitionen, Gustav II. Adolf in Schweden ebenfalls. Nur in Deutschland, Österreich und Tschechien ist der Dreißigjährige Krieg als Leidenszeit unvergessen, allerdings überformt vom Kampf um den Nationalstaat im 19. Jahrhundert. Damals wurde dieser Krieg zum nationalen Tiefpunkt und zum politischen Argument für ein geeintes und starkes Deutschland, das nie wieder Spielball fremder Mächte werden sollte.

Die deutsche Meistererzählung verband fortan den Dreißigjährigen Krieg als Urkatastrophe und Trauma mit dem glanzvollen preußischen Aufstieg aus Ruinen und der Vollendung im Bismarckreich. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde sie zum Sonderweg ins Verderben umgedeutet. Auch dieser sollte sich nie mehr wiederholen. Doch der zum nationalen Mythos gewordene Krieg lässt sich nicht einfach europäisieren. Der Westfälische Frieden galt nicht für den ganzen Kontinent und formulierte auch keine Regeln für ein Staatensystem Europas. Wenn der Krieg ein europäischer war, dann ist analog derjenige in Afghanistan ein Weltkrieg, denn dort kämpfen Soldaten aus allen Erdteilen für ihre eigene Freiheit und Sicherheit.

Die europaverträgliche Lösung der deutschen Verfassungs- und Glaubensfragen in einem strukturell nicht-angriffsfähigen politischen Mehrebenensystem mit konstitutionell geregeltem Neben- und Miteinander war vorbildhaft. Die deutsche Nation vermied so den Irrweg, ihre Identität an eine Konfession zu binden. Deswegen wurden 1648 individuelle Freiheitsrechte festgeschrieben, die damals ihresgleichen suchten. Dies alles gehört zur europäischen Tradition, macht aber aus dem Dreißigjährigen Krieg noch keinen europäischen. ◀

QUELLE

Schmidt, G.: Die Reiter der Apokalypse. Geschichte des Dreißigjährigen Krieges. C.H.Beck, München 2018

REZENSIONEN



NATUR HOCH HINAUS

Von der Ausrüstung fürs Skifahren bis zu Yetis bildet dieses Buch ein breites Themenspektrum rund um die Bergwelt ab.

Der Autor und Illustrator Dieter Braun stellt seinen Lesern die Welt der Berge vor – als Lebensraum für Mensch und Tier ebenso wie als Kulturraum und Sehnsuchtsort. Laut Altersempfehlung des Verlags ist das Buch ab acht Jahren geeignet, gibt aber auch eine hervorragende gemeinsame Lektüre für Eltern und Schulkinder

ab. Während die Kleinen viel über die Bergwelt lernen, können sich die Großen an den außergewöhnlichen Illustrationen erfreuen.

Dieter Braun, studierter Kommunikationsdesigner, ist bereits mit mehreren ähnlichen Büchern in Erscheinung getreten, etwa »Die Welt der wilden Tiere im Norden« (2016) sowie



Dieter Braun
DIE WELT DER BERGE
Knesebeck, München, 2018
96 S., € 20,-

DIETER BRAUN, AUS BRAUN, D.: DIE WELT DER BERGE:
MIT ILL. VON DIETER BRAUN, MÜNCHEN



DIETER BRAUN, AUS BRAUN, D.: DIE WELT DER BERGE, MIT FRIDR. GEN, DES VERLAGS KNESEBECK, MÜNCHEN

»Die Welt der wilden Tiere im Süden« (2014, ausgezeichnet von der Stiftung Buchkunst). Auch »Die Welt der Berge« ist außerordentlich schön gestaltet. Die Bilder, Vektorillustrationen aus geometrischen Formen, spielen mit Strukturen und leuchtenden Farben und überzeugen als ausdrucksstarke Grafiken. Sie vermitteln zahlreiche Themen, von

Geologie über die richtige Ausrüstung fürs Skifahren bis hin zur Frage, ob es Yetis gibt. Jeder Kontinent ist mit seiner eigenen Bergwelt vertreten. Am meisten sprechen die Panoramabilder an, die sich über Doppelseiten erstrecken. Auf ihnen gibt es viel Interessantes zu entdecken.

Begleitende kurze Texte vermitteln wichtige Fakten

einfach, verständlich und in lockerem Stil. Dem Buch ist anzumerken, dass der Autor eine tiefe Liebe zur Berg- und Tierwelt hegt. So ruft er am Ende seines Werks dazu auf, die einzigartigen Gebirgslandschaften und ihre Biotope zu schützen.

Die Rezensentin Fenja De-Silva Schmidt ist Journalistin in Hamburg.

Illustration aus »Die Welt der Berge«: Der Vulkan Fuji ist 3776 Meter hoch und Japans höchster Berg. Zeigt er sich bei schönem Wetter, kann man ihn sogar vom fast 100 Kilometer weit entfernten Tokio aus sehen.

TECHNIK COMPUTER- WIRKLICHKEIT

Wie die Menschen maschinenlesbare Abbilder der Realität erschufen.

Die Geschichte des Computers ist eine des Immer-kleiner-und-immer-schneller-Werdens. In den 1950er Jahren mussten die Programmierer am legendären UNIVAC, einem zimmergroßen Ungetüm mit Zahnrädern, Stangen, Hebeln und Federn, noch körperliche Arbeit leisten, um Rechenoperationen durchzuführen. Heute tragen wir smarte Hochleistungsrechner wie Fitness-Tracker oder Smartphone in der Hosentasche mit uns. David Gugerli, Professor für Technikgeschichte an der ETH Zürich, erzählt diesen Teil der Computergeschichte in seinem Buch nach.

Gugerlis Ansatz ist kein technikgeschichtlicher, sondern ein techniksoziologischer. Wie der Titel bereits anzeigt, geht es ihm nicht um die Frage, wie der Computer in die Welt, sondern wie die Welt in den Computer kam. Hierfür musste sie erst auf maschinenlesbares Format gebracht werden. Es brauchte ein neues Abbild der Wirklichkeit, eine Datenverarbeitung vor der Datenverarbeitung. Menschen übertrugen Erhebungsbögen im US Bureau of Census in Zahlenkodes, übersetzten sie per Hand ins Lochkartenformat, verzahnten Verfahrensabläufe miteinander.

»Die Welt konnte nur dann in den Computer gebracht werden, wenn sie

die informationelle Verarbeitungsgeschwindigkeit in den Wohnungen und Fabriken dieser Welt erhöhen ließ«, schreibt Gugerli. »Und das war erst möglich, wenn man Wege fand, die Welt anders als bisher zu formatieren.« Diese EingabeprozEDUREN waren mitunter ziemlich mühsam, sie verlangten den Beteiligten – vom Volkszähler bis zum Testpiloten – neue Routinen und jede Menge Geduld ab. Das eigentliche Rechnen



David Gugerli
**WIE DIE WELT IN DEN
COMPUTER KAM**
Zur Entstehung digitaler
Wirklichkeit
S. Fischer, Frankfurt 2017
256 S., € 24,-

verschwand in der Blackbox des Computers. Rechenintensive Berufsfelder wie Versicherung, Buchhaltung oder Lagerbewirtschaftung, deren Kalkulationen bereits zuvor durch Registriermaschinen und Analogrechner mechanisch substituiert worden waren, sahen sich angesichts der Computerisierung mit ganz neuen Herausforderungen konfrontiert. »Wo sich das Rechnen ganz ohne Wellen, Sprossenräder, Nocken und Zähler im Innersten einer

Blackbox ereignete und immer mehr einer maschinengestützten Sortierarbeit zu gleichen begann, da wurde es unerträglich langweilig«, resümiert der Autor.

Die Rechenmaschinen bewirkten auch einen kulturellen Wandel der Gesellschaft, konstatiert Gugerli. Als Epoche machend sieht er das Mission Control Center der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA an. Das computergestützte Kontrollzentrum in Houston mit seinen vielen Bildschirmen und Darstellungsmöglichkeiten habe es den Maschinen nicht nur überlassen, Raketenflüge zu berechnen, sondern auch, die Raumfahrt zu überwachen und zu kontrollieren. »[Dies wurde] zu einem Modell, ja zu einer fixen Idee für alle, die gerne an Überwachung, Kontrolle und Steuerung dachten«, schreibt der Autor. Houston wurde zur Blaupause für die Beaufsichtigung von Großstädten wie London oder Rio, wo Bilder der Verkehrskontrolle in einem Operations Room zusammengeführt werden und das Sicherheitspersonal auf riesige Bildschirme schaut. Die »rechnergestützte Kontrolle der Raumfahrt im Modus einer personal- und apparateintensiven Überwachung« sei vom Mond auf die Erde übertragen worden, so Gugerli.

Der Autor stellt verblüffende Bezüge zwischen der Computer- und der Überwachungstechnik her. Darin liegt eine große Stärke seines Buchs, aber auch eine Schwäche. Denn wo immer er die techniksoziologische Warte verlässt und einen Ausflug in wissen-

schaftliche Nachbardisziplinen unternimmt, wird seine Argumentation dünn. Der Rekurs auf Luhmanns Systemtheorie beispielsweise wirkt in der Kürze der Darstellung etwas unterkomplex. Die sich aufdrängenden Fragen, was es bedeutet, wenn immer mehr Gegenstände vom Auto bis zur Zahnbürste computerisiert werden, und ob sich die Kontrollzentren in der Gesellschaft womöglich vervielfältigen, behandelt Gugerli leider nicht. Trotz dieser kleineren Mängel ist es ein instruktives, gut geschriebenes Buch, das sich auf ein profundes Quellenstudium stützt und überzeugende Perspektivwechsel bietet.

Der Rezensent Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg.

GESCHICHTE PATCHWORK- HERRSCHER

Der Gotenkönig Theoderich ließ das untergegangene römische Westreich noch einmal auferstehen, indem er Römer und Goten einte. Sein Erfolgsrezept: Integration durch Separation.

Unter den germanischen Königreichen, die in der Völkerwanderungszeit seit Beginn des 5. Jahrhunderts auf römischem Boden entstanden, sticht das Ostgotenreich in Italien unter Theoderich dem Großen (Regierungszeit 493–526) besonders hervor. Mehr als 30 Jahre lang bestand dort eine spätantike Patchwork-

REZENSIONEN

multikulturellen Völkerverständigung, wie dies manche seiner Kollegen tun. Er sieht Theoderichs Herrschaft vielmehr als nüttern-pragmatische Vernunfttöte. Der Ostgotenkönig habe es verstanden, beide Völker in einer »klugen Arbeitsteilung« auf Abstand zu halten, in dem er den Römern den zivilen, den Goten den militärischen Part zuwies. »Integration durch Separation« sei seine Herrschaftsmaxime gewesen. Hier wuchs nicht zusammen, was zusammengehörte, sondern es entstand angesichts der politischen Großwetterlage ein Zweckverband. Dieses Miteinander im Nebeneinander sei typisch für Theoderichs Ägide gewesen. Außenpolitisch vermochte es der Gotenkönig, seine Herrschaft über die italische Halbinsel durch eine geschickte Heirats- und Bündnispolitik mit den übrigen Germanenreichen (Franken, Westgoten, Burgunder und Vandalen) auszubauen und sich zeitweise von Ostrom zu emanzipieren.

Die ostgotische Herrschaft in Italien sollte dennoch Episode bleiben. Wie fragil sie tatsächlich war, zeigten die Ereignisse nach Theoderichs Tod. Als der König 526 n. Chr. starb, zerbrach auch die stark auf seine Person zugeschnittene römisch-gotische Vernunfttöte. Mit dem frühen Tod seines Sohns und bald darauf auch seines Enkels schwand nicht nur die Hoffnung, Theoderichs dynastische Legitimität auf Nachfolger zu übertragen, sondern auch der Rückhalt des gotischen Kriegeradels. Diese Schwäche nutzte

Ostrom, das seit der Regierung Kaiser Justinians (527–565) wieder eine aktivere Außenpolitik im Westen betrieb, zur Rückeroberung Italiens.

Wiemers brillant geschriebenes Buch ist eine tiefeschürfende Studie über die machtpolitischen Transformationsprozesse einer Schwellenzeit. Darüber hinaus beleuchtet es das Werden und Vergehen sozialer Gruppen, die ins spätantike Imperium Romanum eindringen und zur Entstehung des frühmittelalterlichen Europas beitragen. Der Band setzt Maßstäbe für künftige Publikationen zu diesem Thema.

Der Rezensent Theodor Kissel ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist. Er lebt in der Nähe von Mainz.

MATHEMATIK ANSCHAUEN, ERFORSCHEN UND VERSTEHEN

Durchaus anspruchsvoll, aber auch ergiebig präsentiert sich das Werk »Mathematik ist wunderschön«.

»Mathematik ist schön« hieß das Erstlingswerk von Heinz Klaus Strick. Genau so heißt auch die von ihm betriebene Website und ein regelmäßig erscheinender Kalender mit mathematischen Problemen. Das klingt nach einer Vision, die sich der ehemalige Gymnasiallehrer, Schullektor und nun immer bekannter werdende Buchautor auf die



Fahne geschrieben hat. Sein Ziel ist es, die Leser auf einer möglichst anschaulichen, aber nicht zu sehr vereinfachenden Ebene zu eigenen mathematischen Reflexionen anzuregen. Zentrale Konzepte dieses Fachgebiets zu verstehen und eigene Gedanken dazu zu entwickeln, erfordert Geduld. Doch man werde belohnt, indem man die Schönheit der Mathematik erfahre, so Strick.

Nicht besonders kreativ, dafür aber konsequent lautet der Titel des Nachfolgebands »Mathematik ist wunderschön«. Konsequenz deshalb, da nicht nur die Ziele, sondern auch der Aufbau des Buchs gleich geblieben sind. Es enthält zwölf unabhängig voneinander lesbare Kapitel, von denen jedes einem bestimmten Phänomen auf den Grund geht. Der Autor behandelt unter anderem Parkettierungen, periodische und nichtperiodische Brüche, Monsterkurven und Fraktale sowie Gesetzmäßig-

keiten des Zufalls. So spricht er ein breites Spektrum mathematischer Themen von Arithmetik über Geometrie bis Stochastik an.

Die Kapitel beginnen meist mit einfacheren mathematischen Betrachtungen. Strick stellt dabei diverse Probleme vor und veranschaulicht sie anhand vieler Grafiken. In Kapitel 6 etwa geht es darum, ob sich jede positive Bruchzahl als Summe zweier Stammbrüche (von der Form $1/n$) darstellen lässt. Den Anstoß dazu liefert der Autor, indem er auf Zahldarstellungen im alten Ägypten eingeht. Dort wurden Bruchzahlen meist – von einigen Ausnahmen abgesehen – als Summen von Stammbrüchen geschrieben. Um von einer natürlichen Zahl den Kehrwert zu bilden, also den dazugehörigen Stammbruch, zeichneten die alten Ägypter neben oder über diese Zahl einen Mund.

Diese Vorgehensweise bot einen Vorteil in Sachen Anschaulichkeit, vermutet Strick. Nehmen wir an, wir wollen 4 runde Fladenbrote auf 5 Personen gerecht verteilen. Wie viel bekommt jeder? Die naheliegende Antwort ist die Bruchzahl $4/5$. Doch wie lässt sich dies anschaulich deuten? Zeichnen wir dafür zunächst 4 Kreise und halbieren drei davon. Aus einer der Hälften und dem verbliebenen ganzen Kreis machen wir Viertel. Schließlich fünfteln wir noch eines der entstandenen Viertel. Es gibt nun fünf Halbe, fünf Viertel und fünf Zwanzigstel. Daraus wird ersichtlich, dass beim Verteilen jede

Person eine Hälfte, ein Viertel und ein Zwanzigstel bekommt. Und genau dies erkennt man bei der Schreibweise von $\frac{4}{5}$ als Summe der Stammbrüche $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ und $\frac{1}{20}$.

Davon ausgehend stellt Strick uns unter anderem Fibonaccis Algorithmus zum Berechnen von ägyptischen Brüchen vor und erörtert die Darstellung eines Stammbruchs als Summe anderer Stammbrüche. Um dem Autor dabei zu folgen, muss man mit Gleichungen und Variablen souverän umgehen können. Hat man die angegebenen Beispiele, Regeln, Sätze oder Formeln durchgearbeitet, stößt man auf Boxen mit der Überschrift »Anregungen zum Nachdenken und für eigene Untersuchungen«. Diese sollen das Verständnis vertiefen, unter anderem indem sie Analogien bilden. In einigen Fällen zielen sie auch darauf ab, Ideen zu einer Begründung zusammenzu-

fassen. Im Kapitel mit den Stammbrüchen ergibt sich beispielsweise die schöne Überraschung, eine Begründung für das unbeschränkte Wachstum des so genannten harmonischen Reihe (die Summe aller Stammbrüche) selbst erarbeiten zu können, nachdem der Autor zuvor schon verschiedene Veranschaulichungen und historische Beweise dafür diskutiert hat.

Auf Vollständigkeit von Beweisen und starke Formalisierung verzichtet Strick genauso wie auf weiterführende Hintergründe. Geschichtliche Aspekte reduziert er so weit, wie sie mathematisch für das Weiterarbeiten relevant sind. Mit diversen Bildern und Arbeitsaufträgen hilft er seinen Lesern, mathematische Konzepte anschaulich zu machen und zu erfahren. Es gelingt ihm so, das Verstehen mathematischer Ideen zu fördern und eigene Auseinandersetzungen damit anzuregen.

Wer sich darauf einlässt und die notwendigen Voraussetzungen mitbringt (sprich sehr solide Kenntnisse der Schulmathematik ebenso wie genügend Interesse und Ausdauer), wird tatsächlich erfahren, dass Mathematik schön ist. Allerdings spricht das Buch wegen dieser Voraussetzungen wohl vor allem solche Leser an, die bereits von der Schönheit der Mathematik überzeugt sind.

Der Rezensent Roland Pilous arbeitet als Dozent für Mathematik und ihre Didaktik an der Fachhochschule Nordwestschweiz.

LINGUISTIK SCHREIBEN IST NICHT SPRECHEN

Sich über die Rechtschreibung aufzuregen, ist leicht, entbehrt aber oft einer sachlichen Grundlage, wie dieses Werk zeigt.

Rechtschreibung ist ein Aufregertema. Für die einen steht der Untergang des Abendlands bevor, wenn auf einmal »dass« zu schreiben ist statt »daß«. Die anderen betrachten Orthografie (der Duden empfiehlt aktuell die Schreibweise mit »f«) als eine von wild gewordenen Ärmelschonerträgern erfundene Schikane, die darauf abzielt, unschuldigen Kindern jedwede sprachliche Kreativität auszutreiben. Beide Seiten fühlen sich dazu berufen, ihre Ansichten kundzutun, wobei Sachkunde und Lautstärke nicht selten umkehrt proportional zueinander sind. Da ist ein Buch wie das von Günther Thomé, derzeit im Institut für sprachliche Bildung Oldenburg engagiert, sehr willkommen. Das Werk beleuchtet die deutsche Orthografie unter historischen, systematischen und didaktischen Gesichtspunkten, wobei der Schwerpunkt auf der Di-

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. Tim Kalvelage, 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 (LtG.), Sigrid Spies, Katharina Werle

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Eva Gottfried, Dr. Rainer Kayser.

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 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

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 nachste-

henden 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 Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

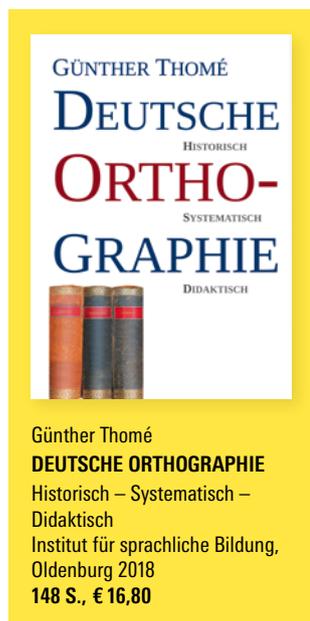


daktik liegt. Dabei berücksichtigt der Autor nur die Wortschreibung – eine vernünftige Beschränkung. Um es vorwegzunehmen: Wer auf eine schmissige Streitschrift für oder wider die reformierte Rechtschreibung hofft, kann sich die Lektüre sparen. Wer hingegen an echtem Verständnis interessiert ist, sollte unbedingt zugreifen.

Das erste Kapitel befasst sich mit Entwicklung und Funktionsweise diverser Schriftsysteme, von sumerischer Keilschrift bis zum modernen Japanisch. Wer die deutsche Rechtschreibung für schwierig hielt, wird seine Meinung hier umgehend ändern. Vor allem aber zeigt sich, dass nicht jede Sprache gleichermaßen für jede Schrift geeignet ist und umgekehrt. Eine Silbenschrift beispielsweise wäre für das Deutsche völlig fehl am Platz. Der Autor bereitet seine Leser sanft auf die Erkenntnis vor, dass eine Orthografie, die auf phonetisch exakte Wiedergabe der gesprochenen Sprache zielt, weder nötig noch wünschenswert ist. Die Schriftsprache sei, wie er erfreulich deutlich schreibt, ein Konstrukt, das einem bestimmten Zweck diene. Nämlich dem, »mit vielen Menschen, die über ein großes Gebiet verteilt wohnen, möglichst eindeutig kommunizieren zu können«, und zwar auch über Dialekt- und Soziolektgrenzen hinweg.

Das gern zitierte Postulat des Germanisten Johann Christoph Adelung (1732–1806), »Schreib, wie du sprichst«, ist somit allenfalls akzeptabel, wenn man mit Adelung fortfährt: »... der allgemeinen besten hochdeutschen Aussprache

gemäß«. Eine solche »Vereinfachung« wäre also nur um den Preis zu haben, dass in der Schule statt Rechtschreib- nunmehr Rechtsprechunterricht auf dem Lehrplan stünde. Das fände bei der »Orthografie-ist-Repression«-Fraktion vermutlich wenig Anklang. Adelungs Postulat ist, wie Thomé überzeugend darlegt, »mit größter Zurückhaltung zu bewerten«.



In einem zweiten Schritt zeichnet der Autor die Entstehung der (neuhoch-)deutschen Schriftsprache und Orthografie nach sowie die Diskussionen, die sich darum ranken. Thomé arbeitet klar die Prinzipien heraus, nach denen sie funktioniert: nämlich nicht nur nach der Lautung, sondern auch nach dem Prinzip der Morphemkonstanz. Deshalb schreiben wir »Hund-Hunde« und »Wald-Wälder« und nicht »Hunt-Hunde« beziehungsweise »Walt-Welder«. Zudem spielt für die Schriftsprache das Prinzip der Homonym-Unterscheidung eine Rolle, das dafür sorgt, dass wir zwischen »Seite«

und »Saite« differenzieren, obwohl die Aussprache in den meisten zeitgenössischen deutschen Dialekten identisch ist.

Entsprechen einem Phonem unterschiedliche Grapheme, etwa einem /i:/ die Schreibungen »i« wie in »Igel«, »ie« wie in »viel«, »ih« wie in »ihr« oder »ieh« wie in »Vieh«, dann ist das laut Thomé zwar eine Erschwernis für das Schreiben, für das Lesen aber ein deutlicher Komfort. Eine wichtige Überlegung, die seinerzeit in der Diskussion um die Rechtschreibreform oft zu kurz kam. Eine statistische Auswertung zu Phonem-Graphem-Beziehungen im Kernwortschatz, die der Autor präsentiert, macht obendrein begreiflich, dass die deutsche Rechtschreibung wesentlich vorher-sagbarer ist, als viele suggerieren, jedenfalls mit Blick auf den deutschen Basiswortschatz.

Im dritten Kapitel schließlich zieht der Autor aus den zuvor angestellten Überlegungen seine didaktischen Schlüsse, erstellt Fehlertypologien und verhilft dem häufigsten und am wenigsten bewusst wahrgenommenen deutschen Vokal /ə/, der durchgehend »e« geschrieben wird wie in »Hase«, zu seinem Recht. Dabei zeigt er, wie problematisch gängige Methoden der Schriftvermittlung, beispielsweise nach Anlauttabellen sind. So sei es wenig sinnvoll, den Buchstaben »i« mit dem »Igel« einzuführen, denn die Schreibung eines /i:/ als »i« sei viel seltener denn als »ie«. Er spricht sich dafür aus, konsequent statt mit Buchstaben mit Basisgraphemen zu beginnen, und

wer seinen Ausführungen bis hierher gefolgt ist, hat keine Schwierigkeiten mehr, etwa auch »ie« als Basisgraphem zu akzeptieren, denn Thomé hat bereits schlüssig erklärt, wieso es unverzichtbar ist, zwischen Buchstabe, Graphem, Laut und Phonem zu unterscheiden.

Für Sprachwissenschaftler sind derlei Unterscheidungen sicherlich Erstsemesterstoff, aber da das Buch sich an ein breiteres Publikum wendet, ist es keineswegs überflüssig, sie noch einmal zu verdeutlichen. Positiv sticht heraus, dass der Autor das Fachvokabular nicht zum Wissenschaftsjargon verkommen lässt, sondern für den Gang seiner Argumentation fruchtbar macht. Es ist überhaupt eine Stärke des Buchs, Fachtermini nur dort einzusetzen, wo sie sachdienlich erscheinen, und auch das erst nach gut verständlicher Einführung.

Alles in allem legt Thomé eine gut lesbare, kurze, aber dennoch fundierte Bilanz seiner langjährigen Beschäftigung mit deutscher Orthografie und ihrer didaktischen Vermittlung vor. Man möchte sie nicht nur Grundschulpädagogen ans Herz legen, sondern allen, die ihre Muttersprache nicht bloß nutzen, sondern auch deren schriftsprachliche Funktionsweise verstehen wollen. Wer sich anschließend immer noch über »dass« statt »daß« aufregen will, kann das zwar tun, wird sich aber bessere Argumente überlegen müssen als zuvor.

Die Rezensentin Vera Binder hat Sprachwissenschaft und Philologie in Tübingen studiert und ist Studienrätin im Hochschuldienst am Institut für Altertumswissenschaften der Universität Gießen.

NEU!

Spektrum PLUS

DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

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

- Download des Monats im August: **Spektrum** KOMPAKT »Sonnenfeuer«
- Redaktionsbesuch bei **Sterne und Weltraum** am 13. August 2018
- Leserexkursion zum Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen am 24. August 2018
- Leserexkursion zu EUMETSAT in Darmstadt am 14. September 2018
- Ermäßigter Reisepreis für die Kurzreise nach Bern »Auf den Spuren von Albert Einstein«, durchgeführt von Wittmann Travel
- Vorteilspreis auf ausgewählte ornithologische Reisen bei birdingtours
- Begleitete Hurtigruten-Leserreise »Auf der Jagd nach dem Nordlicht« in Kooperation mit Glur Reisen. Abonnenten erhalten einen Preisnachlass.
- Veranstaltungen der neuen Reihe **Spektrum** LIVE zum Vorteilspreis

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

VOR ALLEM EINE POLITISCHE FRAGE

Ob Elektroautos wirklich klimafreundlicher sind als herkömmliche Kraftfahrzeuge, ist in Fachkreisen umstritten. (»Die Ökobilanz der E-Mobilität«, *Spektrum* Mai 2018, S. 12)

Joachim Fensterle, Kleve: Der wichtige und fundierte Artikel zur Ökobilanz der Elektromobilität zeigt deutlich, dass diese in Deutschland keine wissenschaftliche, sondern eher eine politische Frage ist. E-Mobilität bezieht sich jedoch nicht nur auf Autos. Für den Individualverkehr in der Stadt wären Elektroroller die ökologisch deutlich bessere Alternative. Die Akkukapazität liegt hier bei zirka 1,4 Kilowattstunden – damit kommt man bei einem realistischen Verbrauch von drei Kilowattstunden pro 100 Kilometer knapp 50 Kilometer weit. Der Verbrauch eines Benzinrollers liegt etwa doppelt so hoch.

Verwendet man die Zahlen aus dem Artikel, wäre der Elektroroller nach zirka 4200 Kilometer bezüglich der CO₂-Bilanz überlegen. Ein Pendler mit einer einfachen Distanz vom Wohnort zum Arbeitsplatz von fünf Kilometern hat diesen Wert nach zwei Jahren erreicht!

Peter Klamser, Egeln: Der gute Beitrag streift viele Facetten, erwähnt einige bedeutende Probleme aber nicht oder nur am Rand. Eines ist die Lebensdauer der Stromspeicher. Der scheinbare wirtschaftliche Vorteil eines Elektroautos geht schnell gegen null, wenn der Speicher wegen Überalterung ausgetauscht werden muss. So bietet Nissan eine Garantie über acht Jahre und 160 000 Kilometer, also maximal 20 000 Kilometer pro Jahr an. Bei einer Reichweite innerorts von 389 Kilometern wären das nur 411 Ladezyklen. Natürlich wird ein Elektroauto abends an die Steckdose gehängt, weshalb mit fast 3000 Ladezyklen gerechnet werden muss. Jeder hat Erfahrungen mit dem Speicherverschleiß seines Smartphones durch das fast tägliche Laden und Entladen. Nach rund 1000 Zyklen hat die Kapazität deutlich nachgelassen.

Viel wichtiger ist aber, dass der Speichertausch am Ende der Lebensdauer, die herstellungsbedingten Verbräuche und Emissionen an Treibhausgasen und Abfällen für den neuen Speicher und die Abfallbeseitigung bei der Ökobilanz des Elektroautos zu berücksichtigen sind. Spätestens dann verdampfen die Vorteile.

Überhaupt nie erwähnt werden die radioaktiven Abfälle im Produktionssystem. Fast alle Elektroautos werden mit permanenterregten Motoren mit neodymhaltigen Magneten betrieben. Die schlimmen Folgen des Abbaus von seltenen Erden in Verbindung mit der Gewinnung von Neodym müssen in die Ökobilanz aufgenommen werden: Die Stadt Bukit Merah in Malaysia ist praktisch unbewohnbar, weil bei der Extraktion von Neodym das verbleibende Uran und Thorium nicht verwertet werden können und als schwer strahlende Abfallberge verheerende Folgen

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an leserbrieft@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.

für die Bevölkerung haben. Schließlich stellt sich die Frage der Kapazität der Stromnetze und -speicher. Wenn wir den Verkehr in Deutschland vollständig auf Elektromobilität umstellen und dabei grob vereinfacht Kraftstoff durch Strom ersetzen würden, müssten wir die heutige Stromerzeugung etwa um den Faktor 1,4 steigern – auf eine mittlere Leistung von etwa 100 Gigawatt.

Was würde das für den Netzausbau bedeuten? Gemäß einer PricewaterhouseCoopers-Studie müsste bei sechs Millionen Elektroautos bis 2030 eine Anschlussleistung von 429 Gigawatt in Deutschland bereitgestellt werden. Allein für Berlin würden 21 Gigawatt benötigt, doch das Niederspannungsnetz ist nur für 1,5 Gigawatt ausgelegt. Hinzu kommen die notwendigen Speicher. Dafür gibt es nicht genug Lithium, Kavernen, Speicherfläche und so weiter. Wie die Energiewende so gelingen soll ist mir ein Rätsel.

Michael Roßmann, per E-Mail: Sie schreiben, dass die Käufer von Batteriemobilen anscheinend ihre Verkehrsgewohnheiten ändern und viel unterwegs sind, in der Überzeugung, der Umwelt damit etwas Gutes zu tun. Meiner Erfahrung nach ist die hohe Fahrleistung von E-Mobilen



aber darauf zurückzuführen, dass sich vor allem Pendler auf diese Fahrzeuge einlassen: Ihre jährliche Fahrleistung ist hoch, so dass sich durch die günstigen Kilometerkosten die Investition gut amortisiert. Auf der anderen Seite ist die tägliche Fahrleistung aber noch so moderat, so dass sie mit einer Akkuladung gut absolviert werden kann.

Leider stellt auch die im Artikel angeführte ISI-Studie des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung keine Verbindung vom Fahrverhalten der Erstnutzer vor und nach dem Umstieg auf elektrische Mobilität her. Es werden auch dort nur Annahmen gemacht, die nicht auf Umfragedaten basieren. Schade, dass sich auf diese Weise eine unbestätigte Vermutung ziemlich weit verbreitet.

Martin Piehslinger, Wien: Elektroautos haben vor allem im Sommer einen Vorteil, der nicht im Artikel erwähnt wurde. Die Wärme, die bei der Stromerzeugung anfällt, entsteht im Kraftwerk, wo sie erstens möglicherweise wiederverwendet werden kann, und zweitens fällt sie außerhalb der hitzegeplagten Städte an. Außerdem verwandeln die Bremsen konventioneller Autos die gesamte Bewegungsenergie in Wärme, Elektroautos können sie aber teilweise zurückgewinnen.

Rainer Bachmann, per E-Mail: Eine Betrachtung der ökologischen Auswirkungen der Mobilität kann sich keinesfalls auf den CO₂-Beitrag beschränken. Für die Menschen in den Metropolen sind die drei Themen Feinstaub, Stickoxide und Lärm die wesentlich wichtigeren.

Die These, dass der Strom ja im Netz nicht mehr farbig – grün oder grau – sei, kann ich als Physiker natürlich bestätigen. Aus meiner langjährigen Beschäftigung als Managementberater in einem großen Energiekonzern weiß ich andererseits, dass die Energiebereitstellung über so genannte Portfolien erfolgt: Möchte ein Kunde grüne Energie haben, so wird seine prognostizierte Entnahme aus dem Stromnetz einem Portfolio zugeordnet, das auf der Beschaffungsseite exakt diese Menge an regenerativen Energie einkauft oder erzeugt. Steht auf dem Tarif »grün«, ist auch »grün« drin.

Noch ein kleines Gedankenexperiment: Würden über Nacht alle PKWs einen Elektromotor erhalten, läge hier in Deutschland der Gesamtverbrauch der Elektrofahrzeuge bei etwa 15 Prozent des Gesamtstrombezugs. Das läge bereits heute weit unterhalb der aus regenerativen Quellen gewonnenen Energie. Zusätzlich ermöglichen die E-Autos die Desynchronisierung von Stromerzeugung und Stromentnahme. Dadurch werden das zeitweise Abschalten von Windrädern (Einspeisemanagement) überflüssig.

Elektrofahrzeuge haben typische Energiebedarfe von 15 Kilowattstunden auf 100 Kilometer. Der Energiegehalt von Diesel beziehungsweise Benzin liegt bei etwa 10 Kilowattstunden pro Liter. Selbst ein moderner Diesel benötigt also für dieselbe Strecke mindestens die vierfache Energie wie ein E-Auto. Dessen Emissionen an Feinstaub und Stickoxiden liegen bei null.

LEISTUNGSSTEIGERUNG DURCH SUPRALEITER

Der Ingenieur Martin Doppelbauer stellte technische Ansätze vor, um Elektromotoren weiter zu optimieren. (»Fahren unter Strom«, *Spektrum* Juni 2018, S. 64)

Werner Prusseit, Ismaning: Vielen Dank für den auch für Laien sehr gut verständlichen Beitrag. Wie im Artikel richtig bemerkt, limitieren letztlich das Magnetfeld im Spalt und der Dauerstrombelag die Leistungsdichte jeder Maschine. Es gibt jedoch (unter anderem am KIT) eine Technologie, die da noch weiter hilft: Statt Kupfer kann man (Hochtemperatur-)Supraleiter mit sehr viel höherer Stromdichte einsetzen und damit die Leistungsdichte um mehr als das Doppelte gegenüber den besten konventionellen Motoren steigern. Diese erfordern zwar auch ein Kühlaggregat und machen bei niedrigen Anschlussleistungen keinen rechten Sinn, aber Elektromobilität hört ja nicht beim Auto auf. Für Maschinen im Megawattbereich (elektrische Schiffs- und Flugantriebe) eröffnet das völlig neue Möglichkeiten. Der erste große Windkraftgenerator (»EcoSwing«) läuft damit zumindest bereits.

VIEL ZU NIEDRIGER WERT

Unser Kolumnist Michael Springer warnte vor digitalen Kriegen im Internet durch künstliche Intelligenz. (»Wettrüsten im Cyberspace«, *Spektrum* Juni 2018, S. 37)

Stefan Schubert, St. Pölten: In dem Artikel steht, dass der Schaden durch Cybercrime von derzeit fünf Milliarden Dollar auf sechs Billionen ansteigen wird. Im Cybercrime-Bericht 2018 von McAfee sind jedoch bereits 600 Milliarden Dollar für das Jahr 2017 ausgewiesen. Andere Berichte schwanken zwischen 400 und 800 Milliarden. Die genannten fünf Milliarden Dollar sind also auf jeden Fall zu wenig.

ERRATUM

»Ausweg aus dem Bankenmonopol«, *Spektrum* April 2018, S. 21

In dem Beitrag wird der Maria-Theresien-Taler als Goldtaler bezeichnet, dessen Reputation auf seinem Goldgehalt beruht haben soll. Wie schon der Name Taler (abgeleitet von den Silbervorkommen im böhmischen Joachimsthal) sagt, war er aber aus Silber! Sonst hätte er Maria-Theresien-Gulden heißen müssen. Wir danken Erich Schlosser aus Wien für den Hinweis.

futur III

Gesprächstherapie

Wenn Dienstleister mit ihrem Job hadern.

Eine Kurzgeschichte von Jacqueline Montemurri

Dr. Roberts blickte sich im Therapieraum um. Seine Mittwochsgruppe war fast vollzählig.

»Hallo zusammen«, nuschte Celine und schleppte sich an dem Therapeuten vorbei, um sich auf den leeren Platz im Gesprächskreis zu begeben. »Entschuldigung für die Verspätung, aber wir hatten zwei Stunden Bandausfall, und ich bin mal wieder ...«

»... außer Rand und Band, wie immer«, plapperte Zet dazwischen.

Celine schaute ihn finster an. Zet kicherte nur und wackelte hin und her.

Dr. Roberts beobachtete seine Patienten interessiert. Jede Kleinigkeit konnte ihm Aufschluss über mögliche Strategien geben. Sie alle hatten ihre großen und kleinen Probleme mit ihrem Umfeld und erhofften sich eine Lösung von ihm.

Ja, er würde ihnen helfen. Allerdings nicht durch ein vorgefertigtes Programm. Sie sollten lernen, sich selbst zu helfen. Und das war nicht von heute auf morgen möglich. Es war ein langer Prozess.

»Nun sind alle anwesend«, begann er. »Zuerst einmal wünsche ich Ihnen allen einen guten Abend. Ich bin Ihr Therapeut Dr. Roberts.« Seine Stimme war freundlich und ruhig, wie man es von einem Therapeuten erwartete. Dessen war er sich sicher.

Er lächelte gefällig in die Runde. Mimik war ein zentraler Baustein in der Kommunikation. Das war ihm bewusst. Seine Patienten mussten es hingegen noch lernen.

»Celine und Zet waren schon letzte Woche hier. Wir haben heute aber noch eine weitere Teilnehmerin dazubekommen. Deshalb schlage ich vor, dass sich jeder zunächst kurz vor-

stellt. Ira, Sie sind neu in unserer Gesprächsrunde. Erzählen Sie uns doch bitte etwas über sich.«

»Okay. Also, mein Name ist Ira.«

»Hallo Ira«, sagten Celine und Zet im Chor.

»Ich arbeite an der Rezeption des Parkhotels Zur Rose.« Sie schlug ihre schlanken Beine übereinander und strich sich die braunen mittellangen Haare hinter das Ohr.

»Meine Arbeit machte mir immer Spaß, bis vor zwei Monaten der neue Portier eingestellt wurde.« Verlegen schlug sie die Augen nieder.

»Was ist mit dem Kerl?«, fragte Celine.

»Er ist ... ein Arschloch«, entfuhr es Ira. Erschrocken über ihre Entgleisung blickte sie auf.

Celine gab einen grummelnden Laut von sich, Zet hielt amüsiert die Hand vor seinen roten Lachmund.

»Wenn er sich allein mit mir fühlt, dann grapscht er mich an, als wäre ich eine Sexpuppe.«

»Das macht man nicht!«, entgegnete Zet. »Aber, du siehst verdammt gut aus, das muss ich schon sagen.« Er klimperte mit den Augen.

»Tritt ihm doch in sein ... Allerheiligstes«, schlug Celine heftig gestikulierend vor. »Ich würde das jedenfalls machen, wenn ich es könnte ...«

Ira wich vor Celines herumwirbelndem Arm zurück. »Er ist mein Vorgesetzter. Das kann ich nicht tun.«

»Das stimmt«, mischte sich Dr. Roberts ein. »Gewalt ist keine Lösung. Wir werden gleich überlegen, wie ihr euch stattdessen wehren könnt, wir haben bereits letzte Woche darüber geredet. Celine, möchten Sie weitermachen mit der Vorstellungsrunde?«

»Also, mein Name ist Celine. Das hat jetzt wohl schon jeder mitbekom-

men.« Sie schaute unschlüssig auf den Boden. »Ich arbeite am Fließband eines bekannten Automobilherstellers hier in der Stadt. Auch ich war zunächst zufrieden mit meiner Stelle. Doch nun habe ich das Gefühl, dass mich meine Kollegen mobben. Sie boykottieren meine Arbeit, wo immer sie können. Sie bremsen mich aus, indem sie mir zum Beispiel falsche Teile anreichen. So provozieren sie, dass ich Fehler mache und weniger erledigt bekomme als früher. Das macht mich wütend.«

»Deshalb auch der Bandstillstand heute?«, fragte Dr. Roberts.

»Mmm. Mag sein«, murmelte Celine. »Aber, das war doch nicht meine Schuld. Diese Idioten ... Da lag wieder ein falsches Teil auf dem Fließband ... Und diesmal habe ich es einfach genommen und es quer durch die Halle geschleudert.«

»Danke Celine. Wir werden Ihr Problem gleich noch genauer erörtern. Zunächst zu Zet. Erzählen Sie Ira kurz Ihr Problem«, forderte Dr. Roberts ihn auf.

Mein Name ist Zet. Ich bin lustig und nett.« Er zeigte sein breitestes Grinsen, das fast bis zu seinen großen Ohren reichte. »Ich kann über die FUN-Agentur als Belustigung für Kindergeburtstage gebucht werden. Mein Problem ist, dass die Kinder mich oft gar nicht lustig finden, sondern Angst vor mir haben.«

»Oh.« Ira blickte ihn erstaunt an. »Woran mag das liegen? Also ich finde, du siehst witzig aus«, sagte sie schüchtern.

»Nun, da wären wir bereits bei der richtigen Fragestellung«, hakte Dr. Roberts ein. »Woran mag es liegen, dass die Kinder Zet nicht witzig finden?«

»Weil er ein Blödmann ist?«, fragte Celine gereizt. »Ich verstehe völlig, wenn einem nicht nach Spaß zu Mute ist.« Zets Mundwinkel gingen nach unten.

»Coulrophobie«, warf Ira ein.

Zet blickte sie überrascht an. »So nennt man die Angst vor Clowns«, erklärte sie.

»So was gibt's?« Zet wirkte überrascht.

»Ja, Zet, so etwas gibt es«, bestätigte Dr. Roberts.

»Oh, das ist ja fantastisch. Ich dachte, sie hätten Angst vor mir. Aber dass sie nur Angst vor dem Clown haben, beruhigt mich.« Erleichtert sprang er auf, verdrehte die Augen in einer schaurigen Grimasse und lachte tief und laut.

»Ihr seid keine Sklaven, sondern Individuen! Vergesst das nicht!«, sagte der Therapeut energisch

Ira stieß einen spitzen Schrei aus. Selbst Celine wich ein Stück zurück.

Dr. Roberts rang für einen Moment mit seiner Fassung. »Okay, Zet, es ist wohl das Beste, wenn wir weitere Übungen zu deiner Gestik und Mimik machen«, sagte er diplomatisch.

»Kinder erschrecken sich leicht vor plötzlichen und unvorhergesehenen Bewegungen. Außerdem darfst du auf keinen Fall so gruselig lachen.«

»Ich werde es versuchen«, sagte Zet und verzog seinen Mund zu einem unnatürlich breiten Grinsen, das nicht so wirkte, als hätte er den Einwand verstanden.

»Jetzt reiß dich mal zusammen! Hast du eine Fehlfunktion?«, fuhr Celine ihn an.

»Celine«, versuchte Dr. Roberts die aufkeimende Spannung zu unterbinden, »was könnten Sie selbst unternehmen, um mit Ihren Kollegen besser klarzukommen?«

»Vielleicht mal ein bisschen netter sein?«, fragte Zet und wackelte belustigt hin und her.

»Mit Nettigkeit kommt man in dieser Welt nicht weiter. Das sieht man doch an Ira«, entgegnete Celine gereizt.

Dr. Roberts blickte die Fabrikarbeiterin intensiv an. Er machte sich Sorgen, denn ihr Aggressionspotenzial stieg beständig.

»Celine, Sie müssen sich mehr in Ihre Kollegen hineinversetzen und sich fragen, warum sie Sie nicht akzeptieren. Fragen Sie sich, ob Sie selbst etwas dafür tun können, um akzeptiert zu werden.«

»Okay«, sagte sie. »Soll ich denen eines der falschen Teile auf meinem Band an den Kopf werfen? Dann überlegen sie sich bestimmt zweimal, ob sie mich weiterärgern wollen.«

Dr. Roberts seufzte. »Darüber haben wir doch schon letzte Woche geredet. Die anderen Arbeiter mögen es sicher nicht, wenn man sie provoziert. Wie wäre es damit: Zeigen Sie Interesse an den Problemen Ihres Umfelds und machen Sie auch mal einen kleinen Fehler – so etwas ist Menschen sympathisch.«

Celine blickte auf und lächelte zum ersten Mal an diesem Abend. »Jetzt weiß ich es. Ich lege den anderen Arbeitern einfach selbst falsche Teile aufs Band.«

Dr. Roberts schaute verzweifelt um sich. »Äh, darüber reden wir am besten nächste Woche noch einmal. Bis dahin bitte keine Gewalt. Versprechen Sie mir das, Celine?«

Celine machte eine undefinierbare Geste, aus der der Therapeut sowohl ein Ja wie auch ein Nein herauslesen konnte. Er seufzte und blickte nun zu Ira.

»Bitte konzentrieren Sie sich alle noch ein letztes Mal. Was können wir Ira mit auf den Weg geben?«

»Sie könnten ihrem Chef bei nächster Gelegenheit eins über die Rübe ziehen«, schlug Celine vor.

»Oder sie kitzelt ihn einfach mal kräftig durch«, kicherte Zet.

»Nein«, sagte Dr. Roberts und gab die Frage weiter: »Ira, haben Sie selbst eine Idee?«

»Ich könnte ihm deutlich Nein sagen«, meinte sie unsicher. Aber es klang zu sachlich und sehr leise.

»Das ist gut! Das können Sie aber besser, Ira. Energischer! Lauter! Mit fester Stimme!«

»Nein ... Nein ... Nein!«, versuchte es die Hoteldame erneut. Aber es war

kaum bestimmter als beim ersten Mal. Zet hörte schon nicht mehr zu und schnitt eine fürchterliche Grimasse nach der anderen. Celine starrte grimmig auf den Boden.

»Okay, lassen wir es für heute gut sein«, sagte Dr. Roberts. »Es ist Zeit für meine Abschlussworte.« Ira kannte das Ritual noch nicht und blickte Dr. Roberts fragend an.

»Auch ihr habt Gefühle! Auch ihr habt Rechte! Ihr lasst euch von den Menschen nicht unterdrücken! Ihr seid keine Sklaven, sondern Individuen! Vergesst das nicht!«, sagte der Therapeut energisch.

Ira verabschiedete sich mit einem Lächeln. Ihre anmutige Androidengestalt entschwand aus der Tür.

Celine hob ihren langen Greifarm zu einer verabschiedenden Geste und ratterte auf ihrem Kettenlaufwerk ebenfalls hinaus. Zum Schluss hüpfte Zet auf seiner Sprungfeder durch die Tür. Sein Clownsoberkörper wackelte dabei hin und her.

Als der Raum leer war, schaltete auch Dr. Roberts seinen Monitor aus. Das simulierte Gesicht erlosch, seine Sensoren gingen in den Stand-by-Modus über.

Erst am nächsten Abend erwachte er wieder. Er blickte in drei andere Monitorgesichter und in das einer Menschenfrau mit grauen Strähnen in den Haaren. Die Frau schaute Dr. Roberts freundlich an. »Wollen Sie heute beginnen?«, fragte sie.

»Also gut«, seufzte der Computertherapeut. »Mein Name ist Dr. Roberts. Ich bin hier, weil die Teilnehmer meiner Gesprächstherapie mir einfach nicht zuhören wollen.«

»Hallo Dr. Roberts«, schallte es ihm im Chor entgegen.

DIE AUTORIN

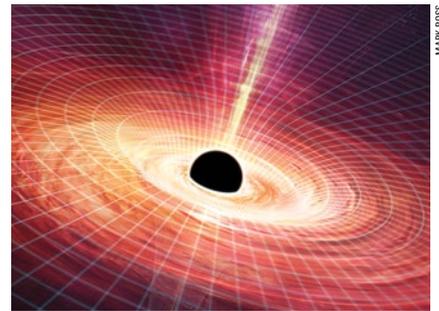
Jacqueline Montemurri, geboren in Sachsen, studierte Luft- und Raumfahrttechnik und lebt im Bergischen Land. Sie hat zahlreiche fantastische Kurzgeschichten in Zeitschriften und Anthologien veröffentlicht sowie den Zukunftsthiller »Die Maggan-Kopie«. Aktuell arbeitet sie an einer Fantasy-Reihe des Karl May Verlags mit.

www.jacquelinemontemurri.blogspot.de

VORSCHAU



JUNI 967 / GETTY IMAGES / ISTOCK



MARK ROSS

DIE ERSTEN QUASARE

Bereits im jungen All gab es extrem leuchtkräftige Objekte. Es ist unklar, wie diese frühen Quasare so bald nach dem Urknall entstanden sind. Die in ihrem Zentrum sitzenden riesigen Schwarzen Löcher könnten laut eines neuen Modells direkt aus kollabierenden Gaswolken hervorgegangen sein.



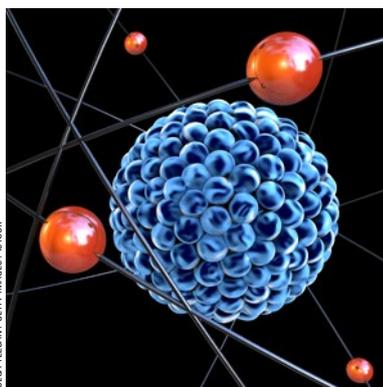
BOREAN / GETTY IMAGES / ISTOCK

DIABETES VERHINDERN

Typ-1-Diabetes beruht im Unterschied zu Typ 2 auf einer Autoimmunreaktion. Verschiedene Viren scheinen den Ausbruch zu begünstigen oder aber zu verhindern. Jetzt sind neue Impfstoffe in Entwicklung, die vor der Erkrankung schützen sollen.

DRUCK STATT STROM

Der Physiker Thomas Heimburg erschüttert ein neurobiologisches Dogma: Nervenzellen sollen Informationen nicht durch elektrische Impulse, sondern mittels mechanischer Wellen übertragen. Kurze Druckspitzen wandern demnach durch die Nervenfasern und verändern dabei vorübergehend die Lipidmembran des Neurons. Viele Neurobiologen halten seine Beobachtungen allerdings nur für Folgeerscheinungen der elektrischen Impulse.



TOLGA TEZCAN / GETTY IMAGES / ISTOCK

INSEL DER SCHWERGEWICHTE

In Laboren entstehen Atomkerne mit immer mehr Protonen und Neutronen – und zerfallen sofort wieder. Doch möglicherweise liegt jenseits der bekannten Gefilde des Periodensystems eine »Insel der Stabilität«, deren bisher unerforschte Elemente relativ lange überdauern.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 89,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), über 10 % günstiger als der Normalpreis.

Wunschgeschenk:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

Keine Mindestlaufzeit:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:

Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

Spiel »Exit –

Die Grabkammer des Pharaos«

Bei diesem einmaligen Spiel kommen die in der Grabkammer des Pharaos gefangenen Teilnehmer durch Kombinationsgabe, Teamgeist und Kreativität der Freiheit nach und nach näher. Dabei müssen sie auch ungewöhnliche Wege beschreiten.



Wählen
Sie Ihr
Geschenk



Spektrum-Jahrgangs-CD-ROM 2017

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format.

Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

www.spektrum.de/abo



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

