

Spektrum

der Wissenschaft

Was ist Wahrheit?

Wie Wissenschaft
Erkenntnisse gewinnt

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

VIREN Überraschend komplex – und vielleicht doch lebendig
500 JAHRE REFORMATION Warum ein Gelehrtenstreit eskalierte
TRINKWASSER Gefahr durch Perfluorcarbone



Spektrum gibt es auch digital.



Das Digitalabo von **Spektrum** der Wissenschaft kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-; Angebotspreis nur für Privatkunden)

Bestellen Sie jetzt Ihr Digitalabo!

service@spektrum.de

www.spektrum.de/digitalabo





EDITORIAL

DIE WAHRHEIT DES ANDEREN

Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Er selbst konnte die Rede nicht halten. Da seine Frau sich das Bein gebrochen hatte, musste Steven Chu kurzfristig aus Deutschland abreisen. Seinen Vortrag »Wissenschaft als Versicherungsschein gegen die Risiken des Klimawandels« verlas stattdessen ein anderer Nobelpreisträger, William Moerner (Videomitschnitt: www.mediatheque.lindau-nobel.org/videos/36844/2017-chem-keynote-chu). Ende Juni hatten sich am Bodensee 28 der höchstdekorierten Wissenschaftler für das diesjährige Lindauer Nobelpreisträgertreffen zusammengefunden, um gemeinsam mit mehr als 400 Nachwuchstalente über Probleme der Chemie und verwandter Fächer zu diskutieren. Chu, selbst Physiker und von 2009 bis 2013 Energieminister der USA, hatte in dem Manuskript seiner Eröffnungsrede ein eindringliches Plädoyer dafür formuliert, die Befunde der Klimaforschung ernst zu nehmen, und geißelte deren Missachtung durch die aktuelle US-Regierung. Nachdem Moerner den Vortrag seines Laureaten-Kollegen gehalten hatte, wurde er gefragt, ob er selbst die Lage ähnlich düster wie Chu beurteile. Die Antwort des Chemikers: Zwar könne man die Klimaveränderung in Teilen vielleicht noch abmildern. Niemand mehr könne jedoch bezweifeln, dass wir sowohl Zeugen einer globalen Erwärmung seien – als auch deren Verursacher. Wörtlich prangerte er »fehlenden Respekt vor der wissenschaftlichen Methode und den wissenschaftlichen Fakten« an.

Doch was sind Fakten, was Erkenntnisse? Wie kommen Wissenschaftler zu ihren Aussagen über die Welt? Welche Wahrheiten über deren Beschaffenheit enthalten ihre Formeln und Modelle? Für dieses Heft haben wir ein Titelthema gewählt, das grundlegender kaum sein könnte für ein Wissenschaftsmagazin – und nach mehr als 2000 Jahren abendländischer Philosophiegeschichte derzeit wieder topaktuell erscheint. In seinem Essay ab S. 12 begründet der Naturphilosoph Michael Esfeld von der Universität de Lausanne, warum der Realismus das beste epistemologische Konzept für unsere Erkundung des Universums darstellt. Im anschließenden Interview ab S. 19 erläutert der Physiker Michael Krämer von der RWTH Aachen ein aktuelles Anwendungsbeispiel dafür: wie wir aus dem Datenwust von Beschleunigern Gewissheit über die Existenz neuer Elementarteilchen oder gar neue Naturgesetze gewinnen können.

Eine erhellende Lektüre wünscht Ihr

Carsten Könneker



NEU AM KIOSK AB 28.7.

Wie sieht die Zukunft der Menschheit aus?
Unser **Spektrum Spezial** Biologie – Mensch – Kultur 3.17
gibt Antworten auf diese Frage.

AUTOREN DIESER AUSGABE



PATRICK FORTERRE

Der Mikrobiologe vom Institut Pasteur in Paris sucht Hinweise auf LUCA, die Urmutter aller modernen Zellen. Dazu nimmt er besonders die Viren unter die Lupe (S. 34).



KIMBERLY CARTIER UND JASON T. WRIGHT

Die US-amerikanischen Astrophysiker fahnden im Leuchten von Sternen nach Signalen von Exoplaneten. Die Lichtkurve, von der sie ab S. 58 berichten, entzieht sich jedoch jeder konventionellen Erklärung.



VOLKER REINHARDT

Über Jahre hat der Historiker von der Schweizer Universität Freiburg den Briefwechsel zwischen Luther und dem Vatikan untersucht und so neue Einsichten darüber gewonnen, wie es zur Reformation kam (S. 78).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Salzsee im Outback

Weltrekord bei
Quantenverschränkung

Tiefe Hirnstimulation ohne
Implantate

Weißer Zwerg als
Gravitationslinse

Entstehung des Jupiters

Materialsynthese
per Algorithmus

Alter des *Homo sapiens*

24 FORSCHUNG AKTUELL

Zelluläre Automaten in der Natur

Eidechschuppen rea-
lisieren ein abstraktes
Konzept der Informatik.

Festgelegte Identität

Ein Sicherheitsschalter lässt
Neurone ihre spezifischen
Eigenschaften beibehalten.

Ein Ring, sie zu bündeln

Kompaktes Bauteil für
einfacheren Datentransfer.

Eingriff ins Epigenom

Neue Wirkstoffe gegen
Krebserkrankungen.

33 SPRINGERS EINWÜRFE

Korruptionsbekämpfung mit Hindernissen

Wer Betrug unterbindet,
trifft manchmal auch die
Armen.

57 FREISTETTERS FORMELWELT

Gestauchte und gedehnte Wellen

Kein Ruhm für den Ent-
decker des Doppler-Effekts.

64 SCHLICHTING!

Umkränzttes Lichtkreuz im Quadrat

Je nach Luftdruck erzeugt
Isolierglas seltsame Reflexe.

12 ERKENNTNISTHEORIE

WISSENSCHAFT, ERKENNTNIS UND IHRE GRENZEN

Die Wissenschaft beschreibt die Welt im Wesentlichen so, wie sie ist. Wer das Gegenteil behauptet, muss absurde Konsequenzen in Kauf nehmen.

Von Michael Esfeld

19 INTERVIEW

»ICH SCHÄTZE DIE ANARCHIE IN DER WISSENSCHAFT«

Der Physiker Michael Krämer erklärt, wie Forscher am Genfer Teilchenbeschleuniger LHC neuen Naturgesetzen auf die Spur kommen.

Von Robert Gast

34 EVOLUTION DIE WAHRE NATUR DER VIREN

Serie: Viren (Teil 1) Viren liefern unerwartete Aufschlüsse über die Grenzbereiche des Lebens. Offenbar fachten sie sogar die frühe Evolution entscheidend an.

Von Patrick Forterre

42 ICHTHYOSAURIER UNTERSCHÄTZTE URZEITJÄGER

Lange haben Paläontologen die fischähnlichen Reptilien kaum beachtet. Zu Unrecht: Neue Funde offenbaren eine erstaunliche Artenvielfalt.

Von Traci Watson

50 TOXIKOLOGIE VORSICHT, TRINKWASSER!

Wissenschaftler und Behörden streiten über mögliche Gefahren durch nicht abbaubare chemische Verbindungen im Grundwasser.

Von Charles Schmidt

58 ASTROPHYSIK TABBYS STERN – EIN KURIOSSES OBJEKT

Astronomen ringen um eine Erklärung für das einzigartige Leuchten des Sterns KIC 8462852.

Von Kimberley Cartier und Jason T. Wright

66 MATHEMATIK

DIE SELTSAMEN ZAHLEN DER TEILCHENKOLLISIONEN

Zwischen Experimenten der Hochenergiephysik sowie algebraischen Kurven und Flächen tut sich eine unerwartete Verbindung auf.

Von Kevin Hartnett

72 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

NAPOLEONS PUNKT UND KIEPERTS HYPERBEL

Die klassische Dreiecksgeometrie bietet zahlreiche Überraschungen, die mit elementaren Mitteln zugänglich sind.

Von Christoph Pöppe

78 REFORMATION

EINE GELEHRTENDEBATTE ESKALIERT

Zu Anfang war es nur ein Streit unter Theologen. Doch Luthers Thesen bargen einen Sprengstoff, der die Kirche innerhalb weniger Jahre spaltete.

Von Volker Reinhardt



12

TITELTHEMA
WISSENSCHAFT, ERKENNTNIS UND IHRE GRENZEN



42

ICHTHYOSAURIER
UNTERSCHÄTZTE
URZEITJÄGER



50

TOXIKOLOGIE
VORSICHT, TRINKWASSER!



66

MATHEMATIK
DIE SELTSAMEN ZAHLEN
DER TEILCHENKOLLISIONEN



78

REFORMATION
EINE GELEHRTEN-
DEBATTE ESKALIERT

84 ZEITREISE

Vom Giftapparat der Quallen zur zyklischen DNA

86 REZENSIONEN

Eckhard Fuhr: Schafe

Lotte Ingrisch, Helmut

Rauch: Der Quantengott

Peter Spork:

Gesundheit ist kein Zufall

Christian Tietze (Hg.):

Pharao

Nick Lane:

Der Funke des Lebens

Martin Jenkins, Stephen

Biesty: Abenteuer Weltall

Barbara Post, Stefan Lipsky: Faszination Wikinger

93 IMPRESSUM

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

Haustürverkauf

Ein Vertreter, der die Wünsche seiner Kunden genau kennt.

98 VORSCHAU

Titelbild:

BlackStork / 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





SALZSEE IM OUTBACK

Wasser ist selten im Lake Mackay, einem ausgetrockneten Salzsee an der Grenze zur großen Sandwüste Australiens. Regen, sofern er überhaupt fällt, füllt die Senke oft nur vorübergehend – dann verdunstet er in der Hitze des Outbacks. Aus der Luft fotografiert erscheint der See als beeindruckendes Farbpanorama: Grün- und Blau-töne gehen auf Wüstenpflanzen und Algen zurück, weiße Flächen auf Salz, das beim Verdunsten von Wasser zurückgeblieben ist. Die Aufnahme stammt vom Erdbeobachtungssatelliten Sentinel-2B, der im März 2017 gestartet ist. Seine Spezialkamera macht Bilder mit einer Kantenlänge von 290 Kilometern und erfasst dabei 13 Spektralbänder. Zusammen mit seinem Schwestersatelliten Sentinel-2A benötigt der Späher fünf Tage, um jeden Flecken der Erde einmal abzulichten. Mit der Mission will die ESA unter anderem untersuchen, wie sich Vegetation und Landnutzung auf der Erde mit der Zeit verändern.

ESA-Mitteilung, April 2017



PICTURE ALLIANCE / PHOTOSHOT / JIN LUWANG

Der chinesische Quantensatellit »Micius« sendet die Photonen eines grünen Lasers zu einer Bodenstation. Dort verfolgt ein Teleskop den Satelliten mit roten Ziellasern quer über den Himmel. Wegen der langen Belichtungszeit der Aufnahme erscheint ihr Licht stark aufgefächert.

PHYSIK WELTREKORD BEI QUANTEN- VERSCHRÄNKUNG

► Chinesische Physiker haben einen Weltrekord im Bereich der Quantenkommunikation aufgestellt. Von einem Satelliten aus sendeten sie miteinander verschränkte Photonen zu zwei Bodenstationen, die 1203 Kilometer voneinander entfernt sind. Bisher lag die maximale Distanz für solch eine Verschränkung bei gut 100 Kilometern.

Bei dem Phänomen der Verschränkung handelt es sich um eine fragile Verknüpfung zweier Objekte im Mikrokosmos. Misst ein

Experimentator den quantenphysikalischen Zustand eines der Teilchen, legt er damit automatisch auch den des verschränkten Partners fest – egal wie weit beide Partikel voneinander entfernt sind. In der Realität ist es aber schwierig, solch eine Verbindung über große Strecken aufrechtzuerhalten. Sowohl in den besten verfügbaren Glasfaserkabeln als auch in Luft stoßen Lichtteilchen auf Atome, was die Verschränkung auflösen kann.

Das Team um Jian-Wei Pan von der University of Science and Technology of China in Schanghai startete daher 2016 den Quantensatelliten »Micius«, der in 500 Kilometer Höhe um

die Erde kreist. An Bord des Satelliten sendet ein Laser Photonen aus, deren Polarisationen beim Durchlaufen eines speziellen Kristalls paarweise verschränkt werden. Während er über Tibet flog, sendete der Satellit die Photonen an zwei Bodenstationen im Hochland, wo Teleskope die Lichtteilchen auffingen. Zwar funktionierte das Experiment nur mitten in der Nacht, und selbst da konnten die Physiker in den Bodenstationen bloß bei einem von sechs Millionen ausgesendeten Photonenpaaren die Verschränkung nachweisen. Aber aus Sicht von Experten ist mit dem Satellitenexperiment der Beweis

erbracht, dass eine Quantenverbindung über so große Entfernungen Bestand haben kann.

In Zukunft könnte die Technik beispielsweise in der Kryptografie eine Rolle spielen. Dazu würde eine Reihe verschränkter Photonen an zwei Empfänger gesendet, die eine darin kodierte Zeichenabfolge zum Verschlüsseln ihrer Kommunikation verwenden. Anders als bei konventionellen Codes wäre sichergestellt, dass niemand die Übertragung abfangen hat, denn das würde die Verschränkung zwischen den Lichtteilchen aufheben.

Science 10.1126/science.aan3211, 2017

MEDIZIN TIEFE HIRN- STIMULATION OHNE IMPLANTATE

► Amerikanische Wissenschaftler haben ein neues Verfahren zur Stimulation tief liegender Gehirnregionen entwickelt. Es könnte künftig eine Alternative zur effektiven, aber aufwändigen Behandlungsmethode der Tiefenhirnstimulation werden. Bei ihr implantieren Ärzte insbesondere Parkinsonpatienten Elektroden ins Gehirn, um dort Nervenzellen zu reizen, was die Krankheitssymp-

tome reduziert. Die Methode des Teams um Edward Boyden vom MIT Media Lab in Boston soll schonender sein: Die Forscher stimulieren Hirnareale mit verschiedenen elektrischen Feldern, die von Elektroden auf der Kopfhaut erzeugt werden.

Die Signale haben eine Frequenz von mehreren tausend Hertz, wodurch sie den Wissenschaftlern zufolge tief ins Gehirn eindringen. An einem bestimmten Punkt treffen sich die Wellenzüge, wobei sie sich überlagern. Unterscheidet sich die Frequenz der Felder geringfügig,

entsteht in einem eng umrissenen Bereich ein Feld mit einer Frequenz von wenigen Hertz, das Nervenzellen in der Nähe anregt.

Das Verfahren verspricht unter anderem zusätzliche Flexibilität, da man den Bereich der Überlagerung der Felder präzise festlegen kann. So ließen sich beispielsweise diverse Hirnregionen nacheinander erregen, berichten die Forscher. Bei implantierten Elektroden ist das nicht möglich.

In Computersimulationen und Tests mit Mäusen konnte die Forschergruppe zeigen, dass die Methode den Hippocampus an-

spricht, ohne darüberliegende Schichten zu stimulieren.

Allerdings ist der Wirkungsbereich des Verfahrens räumlich weniger präzise begrenzt als bei implantierten Elektroden, womit es noch nicht anwendungsreif ist. Außerdem ist unklar, was die elektrischen Felder genau im Gehirn bewirken. Die Wissenschaftler sind zuversichtlich, dass sie das Gewebe nicht nachhaltig verändern, und wollen das Verfahren bald in klinischen Versuchen am Menschen testen.

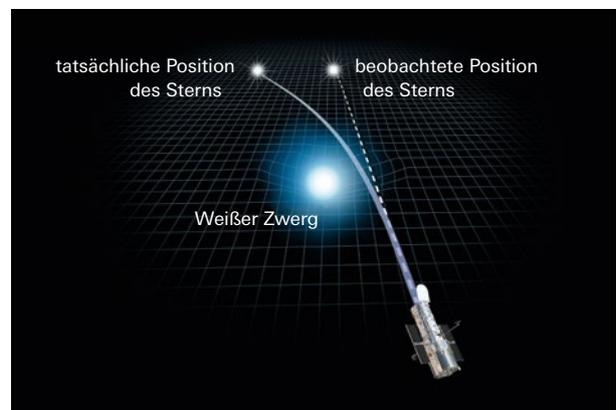
Cell 10.1016/j.cell.2017.05.024, 2017

ASTRONOMIE WEISSER ZWERG ALS GRAVITATIONSLINSE

► Der Gravitationslinseneffekt zählt zu den berühmtesten Vorhersagen von Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Einstein erkannte, dass ein Lichtstrahl einen kleinen Bogen macht, wenn er ein massereiches Objekt passiert. Verantwortlich ist die von Massen verursachte Krümmung der Raumzeit.

Besonders spektakulär tritt sie zu Tage, wenn sich Masse und Lichtquelle genau hintereinander befinden. Dann wirkt das Objekt im Vordergrund wie ein Brennglas. Dieses Phänomen beobachten Astronomen in fernen Galaxien immer wieder. Aber auch wenn Lichtquelle und Masse nicht exakt auf einer Linie liegen, macht sich der Gravitationslinseneffekt bemerkbar und verschiebt die Position des Hintergrundobjekts minimal.

Das konnten Astrophysiker um Kailash Sahu vom Space Telescope Science Institute in den USA nun erstmals bei einem anderen Stern als unserer Sonne beobachten. Mit dem Hubble-Weltraumteleskop nahm das Team den weißen Zwergstern Stein 2051 B ins Visier, der nur 18 Lichtjahre von der Erde entfernt ist. Er zog im Jahr 2014 vor einem anderen, etwa 6500 Lichtjahre entfernten Stern vorüber. Dabei konnten die Wissenschaftler messen, dass die Position des Hintergrundsterns um Nachthimmel um zwei Tausendstel einer Bogensekunde zur Seite rückte – genau wie von Einsteins Theorie vorhergesagt.



Das Licht eines Sterns macht eine Kurve, wenn es das Schwerefeld eines anderen Sterns passiert. Für einen Beobachter wirkt es dadurch so, als befände sich der Stern im Hintergrund an einer unterschiedlichen Position.

Aus der scheinbaren Verschiebung des Hintergrundsterns konnten die Forscher sogar die Masse des Weißen Zwergs berechnen, die demnach bei 0,68 Sonnenmassen liegt. Das Ergebnis widerlegt ältere Abschätzungen, die viel niedrigere Werte geliefert hatten. Somit scheint Stein 2051 B nicht so exotisch zu sein, wie manche Physiker in der Vergangenheit vermuteten. Wahrscheinlich handelt es sich um einen ganz normalen Weißen Zwerg – um eine Sternleiche also, deren Kern aus Kohlenstoff und Sauerstoff besteht.

Science 10.1126/science.aal2879, 2017

NASA, ESA, AND A. FEILD (STScI); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SONNENSYSTEM ENTSTEHUNG DES JUPITERS

► Der Jupiter könnte früher entstanden sein als bisher gedacht. Darauf deutet eine Studie hin, in der Forscher um Thomas Kruijer von der Universität Münster Meteoriten aus den Kindertagen des Sonnensystems analysiert haben. Demnach hatte sich der Kern des Gasriesen spätestens eine Million Jahre nach Zündung des Sonnenfeuers gebildet.

Damals, vor knapp 4,6 Milliarden Jahren, bestand das Sonnensystem noch aus einer ausgedehnten Gas- und Staubscheibe. Wissenschaftler vermuten schon länger, dass Jupiter der erste Planet war, der sich aus diesem Material formte. Computersimulationen legen nahe, dass er spätestens zehn Millionen Jahre nach der Sonne auf den

Plan getreten sein muss. Um das Alter präziser einzugrenzen, analysierte das Münsteraner Team nun 19 Proben aus seltenen Eisenmeteoriten.

Sie waren im jungen Sonnensystem Teil von Asteroiden und sind irgendwann auf die Erde gestürzt. Mittels der Häufigkeit verschiedener Molybdän- und Wolframisotope konnte die Gruppe um Kruijer zeigen, dass die Brocken teils aus dem inneren Sonnensystem stammen und teils von seinem Rand. Aus dem Alter der Proben folgerten die Forscher außerdem, dass diese beiden Meteoriten-Reservoirs im Zeitraum zwischen ein und vier Millionen Jahren nach Entstehung des Sonnensystems getrennt waren.

Die plausibelste Erklärung: Der etwa 20 Erdmassen schwere Kern des Jupiters zog schon damals seine Bahnen um die Sonne. Dabei saugte er

sämtliches Material in seiner Nähe auf, was den Austausch zwischen äußerem und innerem Sonnensystem verhinderte. Erst nach vier Millionen Jahren, als der Planet auf 50 Erdmassen angewachsen war, öffnete sich eine Lücke in der Staubscheibe, vermuten die Wissenschaftler. Dadurch konnte Jupiters Schwerkraft Asteroiden ins innere Sonnensystem umlenken.

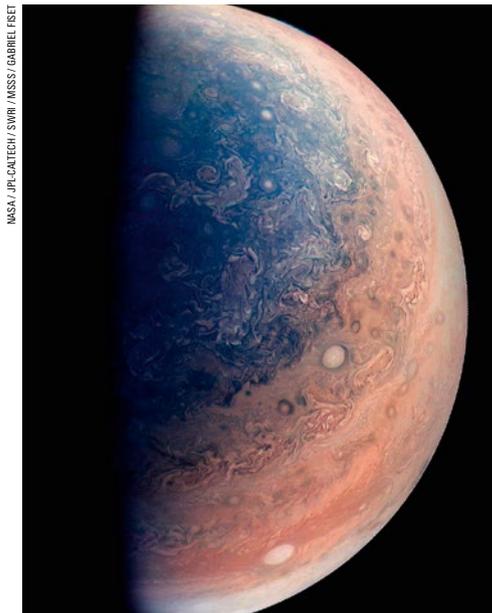
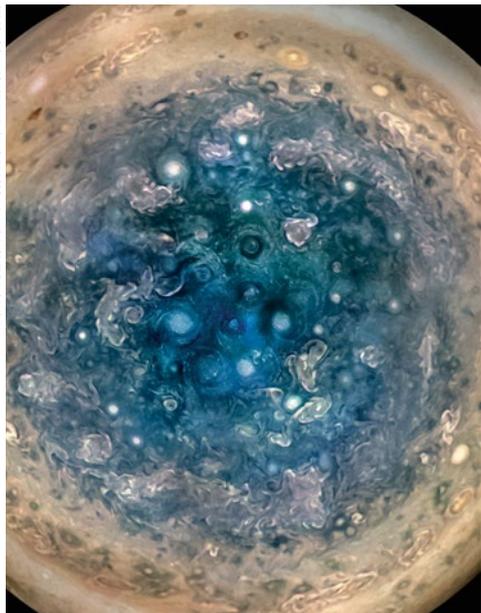
Die Theorie würde erklären helfen, weshalb es im Sonnensystem keine so genannten Supererden gibt. Solche besonders großen Felsplaneten haben Astronomen in vielen anderen Sternsystemen entdeckt. Vielleicht hat Jupiter in unserem Sonnensystem verhindert, dass das Material, das für ihre Entstehung nötig ist, rechtzeitig in die Nähe der Sonne gelangen konnte.

PNAS 10.1073/pnas.1704461114, 2017

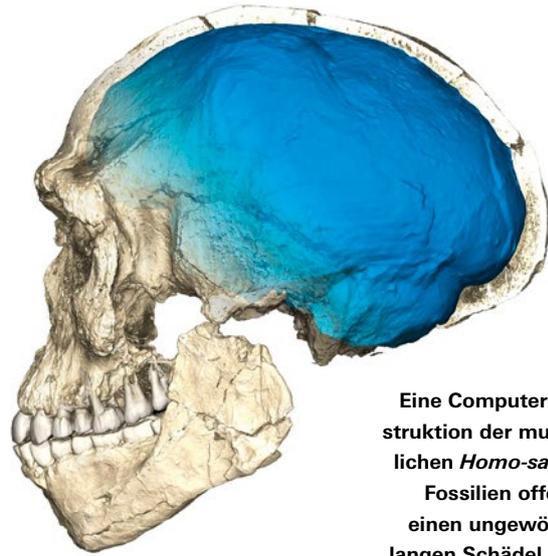
CHEMIE MATERIALIEN- SYNTHESE PER ALGORITHMUS

► Ein zufallsbasierter Algorithmus kann Materialien mit neuartigen Kristallstrukturen entdecken und so vielleicht Chemikern künftig die Arbeit erleichtern. Bislang sind Wissenschaftler bei der Suche nach neuartigen Stoffen auf das langwierige Durchprobieren aller Möglichkeiten angewiesen. Auch wenn sie dabei zunehmend von Computersimulationen unterstützt werden, die Aufbau oder Eigenschaften zu testender Materialien vorhersagen, bleibt das Problem, dass sich deren Prognosen bisher nur im Rahmen der bekannten Strukturen bewegen.

Anders der neue Algorithmus, den eine Gruppe um Matthew Rosseinsky von der University of Liverpool entwickelt hat. Ihr Computerprogramm wird zunächst mit verschiedenen bekannten Materialien gefüttert, die diejenigen Elemente enthalten, aus denen das neue Material zusammengesetzt sein soll – so genannte Module. Im zweiten Schritt setzt das Programm einen zufällig ausgewählten Teil der Module zu einer bekannten Struktur zusammen. Diese durchläuft danach eine Reihe von Vertauschungen, bei denen unter anderem die Reihenfolge der Module, die Module selbst und die Struktur variiert werden. Dadurch können auch Materialien mit neuartigen Kristallgerüsten entstehen. Anschließend ermittelt das



Frischer Blick auf den Jupiter: Der Gasriese könnte nicht nur älter sein als gedacht. Die Raumsonde Juno liefert seit Kurzem auch beeindruckende neue Bilder des Giganten, unter anderem von seinem Südpol, um den etliche Wirbelstürme toben.



Eine Computerrekonstruktion der mutmaßlichen *Homo-sapiens*-Fossilien offenbart einen ungewöhnlich langen Schädel (blau).

ANTHROPOLOGIE **HOMO SAPIENS ÄLTER ALS GEDACHT?**

► Wissenschaftler um Jean-Jacques Hublin vom Max-Planck-Institut (MPI) für evolutionäre Anthropologie in Leipzig haben womöglich die ältesten Fossilien unserer Art gefunden: Sie bescheinigen den Funden ein Alter von etwa 315 000 Jahren – damit könnte *Homo sapiens* gut 100 000 Jahre älter sein als gedacht. Auch der Fundort ist eine Überraschung: Die Fossilien stammen aus Jebel Irhoud, einer Höhlenfundstelle in Marokko.

Bislang hatten die meisten Forscher die Ursprünge des modernen Menschen eher in Ostafrika vermutet. Das Team hat fossile Knochen aus einer Schicht untersucht, die Überreste von mindestens fünf Individuen sowie Reste von Steinwerkzeugen enthält. Zu den menschlichen Relikten gehören Schädel- und Kieferfragmente sowie Zähne. Diese ordneten die Wissenschaftler bereits vom Aussehen her dem *Homo sapiens* zu: Das Gesicht der Individuen sei kleiner und ihre Augenbrauenbögen seien schwächer ausgeprägt gewesen als beim Neandertaler. Außerdem ähnelten

die Zähne mehr den unseren als denen anderer Homininen. Nur die längliche Schädelform ließ sich auch einer älteren Spezies zuordnen.

Überprüft haben die Wissenschaftler ihre zeitliche Einordnung mit verschiedenen Verfahren zur Altersbestimmung. Hilfreich waren dabei die gefundenen Steinwerkzeuge: Mit der so genannten Thermolumineszenzdatierung lässt sich ermitteln, wie viel Zeit seit der letzten Energiezufuhr ins Kristallgitter des Materials – zum Beispiel durch Sonnenlicht – vergangen ist. So datierten die Forscher das Alter der Fundstätte auf 315 000 Jahre, wobei eine Messunsicherheit von 34 000 Jahren besteht.

Demnach könnten moderne Menschen früher aufgetreten sein und außerdem in einer größeren Region gelebt haben. Diese Einschätzung ist jedoch umstritten. Jeffrey Schwartz von der University of Pittsburgh und María Martínon-Torres vom University College London beispielsweise bezweifeln, dass sich die Überreste dem *Homo sapiens* zuordnen lassen. Es fehlten typische Merkmale des modernen Menschen – etwa das markante Kinn und die hohe Stirn.

Nature 10.1038/nature22374, 2017

Programme die Stabilität der Verbindungen. Der stabilste Kandidat wird dann im Labor synthetisiert.

Das Team um Rosseinsky entdeckte auf diese Weise zwei Phasen eines bis dato unbekannt

Materials, zusammengesetzt aus Yttrium, Strontium, Kalzium, Gallium und Sauerstoff, dessen Kristallstrukturen sich auch von den bisher bekannten Stoffen unterscheidet. Eine der beiden Phasen ähnelt

einem der bisher am besten bekannten Ionenleiter, die andere ist mit Perowskiten verwandt, die in Prototypen für künftige Solarzellen verwendet werden. Noch sind die neuen Materialien nicht

optimiert; man könnte zum Beispiel das Yttrium durch Europium austauschen, was interessante optische und magnetische Fähigkeiten des Materials mit sich bringen würde.

Nature 10.1038/nature22374, 2017

ERKENNTNISTHEORIE WISSENSCHAFT, ERKENNTNIS UND IHRE GRENZEN

Die Naturwissenschaft beschreibt die Welt im Wesentlichen so, wie sie ist. Wer das Gegenteil behauptet, lässt sich zwar nicht widerlegen, muss aber absurde Konsequenzen in Kauf nehmen.



Michael Esfeld promovierte 1994 in Münster (Westfalen) über »Mechanismus und Subjektivität in der Philosophie von Th. Hobbes«. Seit 2002 ist er Professor für Wissenschaftsphilosophie an der Universität de Lausanne (Schweiz).

► [spektrum.de/artikel/1478201](https://www.spektrum.de/artikel/1478201)

► Klimaforschung ist ein überaus kompliziertes Geschäft. Die Beteiligten sehen sich veranlasst, neue Forschungsgegenstände zu definieren wie zum Beispiel die atlantische Umwälzströmung (**Spektrum** April 2017, S. 20). Unmittelbar sehen kann man sie nicht; vielmehr postulieren die Forscher die Existenz dieser globalen Strömung, die nahezu den gesamten Atlantik umfasst, weil sie damit eine Fülle von Beobachtungsdaten zu einem einheitlichen Gesamtbild zusammenfügen können. Haben sie sich damit ihre Welt zurecht konstruiert? Sind die Begriffe, mit denen sie das globale Klima beschreiben, nichts weiter als Produkte ihres Hirns, deren Bezug zur Realität zumindest zweifelhaft ist? Sind sie willkürlich gewählt? Könnten sie insbesondere mit gleichem Recht auch anders definiert werden? Ist etwa die gesamte Klimaforschung eine Willkürveranstaltung vergleichbar der Kleidermode oder einem Kunststil – durchaus mit rudimentärem Realitätsbezug und vom Konsens einer großen Anzahl Menschen getragen, aber in wesentlichen Teilen im Diskurs einiger Fachleute ausgehandelt und nicht weiter begründbar? Haben wir daher die Freiheit, sie nicht ernst zu nehmen?

Ich behaupte: Nein, und werde im Folgenden Argumente dafür anführen. Noch mag es bei einem so relativ neuen Gebiet wie der Klimaforschung schwierig sein, diese Argumente mit leicht einsehbaren Fakten zu untermauern. Nehmen wir daher zur Verdeutlichung einen Gegenstand, über den die Physiker und die Philosophen schon länger Zeit hatten, nachzudenken: das Elektron. Unmittelbar sehen kann man es nicht; die Physiker haben seine Existenz postuliert, weil man damit eine Fülle von Beobachtungsdaten zu einem einheitlichen Gesamtbild zusammenfügen kann, und dieses Gesamtbild ist so überzeugend, dass heute niemand mehr ernsthaft an der Existenz von Elektronen zweifelt.

Gleichwohl bestehen ganze philosophische Richtungen darauf, dass solche Zweifel nicht nur erlaubt, sondern streng genommen unwiderlegbar sind (siehe »Die wesentlichen Positionen zur Wahrheit in der Wissenschaft«, S. 18). Es gibt keinen zwingenden Beweis dafür, dass die Physik – oder deren Kleinversion, der Alltagsverstand – die Welt so oder ungefähr so beschreibt, wie sie ist.

Allerdings gibt es gute Gründe dafür, von denen ich zwei wesentliche aufzeigen möchte. Erstens behaupte ich, dass die Physik, philosophisch nur geringfügig weiter gedacht, als sie gegenwärtig bereits praktiziert wird, frei von jeglicher Willkür ist: Sie macht über die Natur keine Annahmen über das hinaus, was sie zwingend annehmen muss, wenn sie überhaupt irgendwelche Aussagen machen will (eine »minimalistische Ontologie«). Eine Alternative zu der so verstandenen Physik könnte also nur in der Realitätsverweigerung bestehen. Zweitens lege ich dar, dass man die von mir vertretene Position, den Strukturen-Realismus, nur ganz oder gar nicht einnehmen kann. Man begibt sich in innere Widersprüche, wenn man die Physik im Allgemeinen akzeptiert, nicht aber gewisse ihrer Teile (zum Beispiel weil sie zu unbequemen Prognosen führen).

Welches System auch immer man erforscht, man sucht dessen Bestandteile auf. Das ist das Erfolgsrezept der

Naturwissenschaften, wie es am augenfälligsten in der Physik realisiert ist. Über mehrere Zwischenstufen haben die Physiker die Natur, die sie vorfinden, in immer kleinere Einheiten zerlegt. Je weiter die Zerlegung fortschreitet, desto mehr verlieren die Objekte an individuellen Eigenschaften. Diese Entwicklung zu Ende gedacht, wäre die Welt als eine sehr große Menge von ausdehnungslosen »Punktteilchen« zu beschreiben. Dass die Dinge in der Welt Eigenschaften haben und insbesondere verschieden sind, liegt nur daran, dass die Punktteilchen, aus denen sie zusammengesetzt sind, in unterschiedlichen räumlichen Beziehungen zueinander stehen.

Minimalistische Ontologie: Die Atome sind nichts, die Beziehungen zwischen ihnen alles

Diese fortschreitende Zerlegung der Natur in immer kleinere und eigenschaftsärmere Einheiten lässt sich in der Geschichte der Physik und der Philosophie vom Altertum bis heute verfolgen. Im antiken Griechenland standen sich zwei Denkschulen gegenüber. Die einen postulieren einen kontinuierlichen Urstoff, bestehend aus den vier Elementen Feuer, Wasser, Luft und Erde, der alles umfasst. Thales von Milet (um 625–547 v. Chr.) behauptet gar, alles sei eine Erscheinungsweise von Wasser. Demgegenüber vertreten die Atomisten, namentlich Demokrit (um 470–380 v. Chr.), die Position, dass alles aus elementaren Teilchen bestehe. Im Unterschied zu einem Urstoff sind Demokrits Atome nicht kontinuierlich und füllen nicht den Raum aus, sondern sind diskret (letztlich punktförmig), und es gibt leeren Raum zwischen ihnen.

Die neuzeitliche Naturwissenschaft ist dann eine Bewegung weg von den Kontinuumsideen hin zum Atomismus: Wasser ist kein Urstoff, sondern besteht aus einer spezifischen Anordnung von Wasserstoff- und Sauerstoffatomen (Ende des 18. Jahrhunderts). Wärme ist kein Stoff, sondern eine Form von Teilchenbewegung (statistische Mechanik, zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts). Es gibt keinen »élan vital«, keinen Lebensstoff, der die organische von der anorganischen Materie unterscheidet; lebende Organis-

AUF EINEN BLICK ES GIBT KEINE ALTERNATIVEN FAKTEN

- 1** Die Welt besteht aus punktförmigen, eigenschaftslosen Teilchen; die Beziehungen zwischen ihnen machen die ganze Physik aus. Das ist das Weltbild, auf das die moderne Naturwissenschaft sich zubewegt.
- 2** Ein physikalisches Gesetz muss nicht nur universell sein, sondern auch dann Aussagen zulassen, wenn wir lediglich begrenzte oder ungenaue Kenntnis vom Zustand des Systems haben.
- 3** Die einzige Erkenntnistheorie, die den Erfolg der modernen Wissenschaft nicht wie ein unerklärliches Wunder erscheinen lässt, ist der Realismus.

men sind vielmehr durch bestimmte Molekulanordnungen gekennzeichnet (spektakulärste Errungenschaft ist die Entdeckung der molekularen Struktur der DNA Mitte des 20. Jahrhunderts).

Im Gegensatz zu seinem antiken Vorgänger ist der moderne Atomismus echte Naturwissenschaft: Er formuliert Gesetze, mit deren Hilfe man das Verhalten der Teilchen berechnen und diese Berechnungen experimentell überprüfen kann. Der Schlüssel zu Gesetzen besteht darin, den Teilchen Parameter zuzuschreiben, die durch ihre Wirkungsweise für deren Bewegung definiert sind. So sagt Ernst Mach (1838–1916) über die Masse in der newtonschen Mechanik: »Die wahre Definition der Masse kann nur aus den dynamischen Beziehungen der Körper abgeleitet werden.« In der Tat: Weil alle Materie bestimmte Bewegungsmuster aufweist, kann man jedem Teilchen einen Parameter namens Masse zuschreiben, diesen durch seine Wirkung auf die Ortsveränderung der Teilchen definieren und dann ein einfaches Gesetz formulieren wie das Gravitationsgesetz, das sowohl die Bewegungen der Himmelskörper als auch die der Dinge auf der Erde umfasst.

Die Hypothese, dass alles aus Elementarteilchen zusammengesetzt ist, erklärt für sich genommen noch nicht die Unterschiede in den makroskopischen Gegenständen. Vielmehr muss man über die Grundhypothese hinaus diese Unterschiede auf Änderungen in der räumlichen Anordnung ihrer Bestandteile zurückführen – was erst solche Bewegungsgesetze leisten.

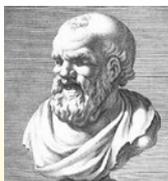
Die Geschichte der Physik nach Newton ist dann allerdings eher von Komplikationen als von weiteren Vereinfachungen geprägt: Es gibt mehr charakteristische Bewe-

gungsmuster der Materie als diejenigen, die durch das Gravitationsgesetz zu erklären sind. Das sind insbesondere Elektrizität und Magnetismus, erfasst durch den Parameter Ladung und die maxwellschen Gesetze der Elektrodynamik im 19. Jahrhundert. In der Quantenphysik kommt beispielsweise der Spin als Charakteristikum der Elementarteilchen hinzu und mit ihm neue Gesetze. Schließlich gelangen wir mit dem Standardmodell der heutigen Teilchenphysik zu einem ganzen Zoo von Elementarteilchen, die sich durch verschiedene Werte von Masse, Ladung und Spin unterscheiden. Hier ist sicher noch nicht das letzte Wort gesprochen. Eine definitive Theorie der Materie in Form möglichst einfacher Gesetze, die mit wenigen Parametern alle Bewegung der Materie im Universum erfassen – dieses Fernziel formuliert zum Beispiel Steven Weinberg, indem er eine »theory of everything« einfordert.

Philosophisch betrachtet sind die Elementarteilchen der Physik keine Substanzen im traditionellen, auf Aristoteles (384–322 v. Chr.) zurückgehenden Sinn, nämlich selbstständige Dinge mit einer inneren Form (»eidos«, Essenz). Vielmehr sind sie formlose Materie, diskret und punktförmig statt kontinuierlich, wie Aristoteles dachte. Für die neuzeitliche Naturwissenschaft wegweisend ist René Descartes (1596–1650), der die Materie allein durch Ausdehnung und Bewegung charakterisiert. In der Tat, das Wesen der Elementarteilchen besteht letztlich allein in ihrer räumlichen Lage, das heißt ihren Abständen zueinander und deren Veränderung in der Zeit, also ihrer Bewegung. Wohlgedenkt, es geht nur um die relative Position der Teilchen zueinander, nicht etwa um eine Position im Sinn von Koordinaten in einem absoluten Raum (dessen

Was die Dinge sind

Demokrit (um 470–380 v. Chr.) gemäß der Überlieferung von Plutarch:



PUBLIC DOMAIN

In dem Leeren zerstreut bewegten sich Substanzen, der Zahl nach unendlich wie auch unteilbar und unterschiedslos und ohne Qualität und für Einwirkung unempfänglich; wenn sie sich einander näherten oder zusammenstießen oder verflüchteten, so träten einige dieser Anhäufungen als Wasser, andere als Feuer, andere als Pflanze und wieder andere als Mensch in Erscheinung.

Isaac Newton (1642–1727), Optik (1704), Buch 3, Frage 31:



PUBLIC DOMAIN

Nach allen diesen Betrachtungen ist es mir wahrscheinlich, dass Gott im Anfange der Dinge die Materie in massiven, festen, harten, undurchdringlichen und beweglichen Partikeln erschuf ... Damit also die Natur von beständiger Dauer sei, ist der Wandel der körperlichen Dinge ausschliesslich in die verschiedenen Trennungen, neuen Vereinigungen und Bewegungen dieser permanenten Theilchen zu verlegen ...

Richard P. Feynman (1918–1988), Vorlesungen über Physik (1964), Band 1, Kapitel 1.2:



CERN

Alle Dinge sind aus Atomen aufgebaut – aus kleinen Teilchen, die in permanenter Bewegung sind, einander anziehen, wenn sie ein klein wenig voneinander entfernt sind, sich aber gegenseitig abstoßen, wenn sie aneinandergespreßt werden. In diesem einen Satz werden Sie mit ein wenig Fantasie und Nachdenken eine enorme Menge an Information über die Welt entdecken.

Existenz die Ontologie der Physik nicht voraussetzt). Alle Parameter, die in den Gesetzen auftreten, namentlich Masse, elektrische Ladung und Spin, sind nicht etwa Qualitäten, die den Elementarteilchen als solchen innewohnen. Sie sind nur durch ihre Funktion, das heißt ihre Wirkungsweise für die Bewegung der Teilchen, definiert. Ernst Cassirer (1874–1945) bringt dieses Verständnis der Natur auf den Punkt, indem er es als eine Entwicklung weg von der Substanz hin zur Funktion beschreibt.

Damit löst sich auch der traditionelle Gegensatz zwischen Atomismus und Holismus auf: Ja, es ist sinnvoll, die Welt als aus Atomen zusammengesetzt anzusehen – das ist die Position des Atomismus –; aber die Atome sind holistisch charakterisiert, weil sie allein durch ihre Position in einem Netzwerk von Relationen gekennzeichnet sind. Ziel der Naturwissenschaft ist es, die Veränderung dieser Relationen durch möglichst einfache Gesetze zu beschreiben.

Das genannte Konzept – die Atome sind nichts, die Relationen unter ihnen sind alles – lässt sich über die Physik hinaus zum Beispiel in der klassischen Genetik anwenden. Hier sind die Atome einzelne Organismen; die sind zwar zweifellos nicht ohne Eigenschaften und innere Struktur, aber es ist sinnvoll, davon abzusehen und nur auf die »Funktion« eines Merkmals zu schauen, hier definiert als die Wirkungsweise für die Fitness des Organismus. Ein und dieselbe biologische Funktion kann physikalisch durch ganz verschieden zusammengesetzte Teilchenkonfigurationen realisiert werden – für das Überleben und die Fortpflanzung eines Organismus kommt es darauf an, dass bestimmte phänotypische Merkmale manifest werden, nicht aber, welche Teilchenkonfiguration diese Merkmale produziert.

Ähnliche Konzepte funktionieren in der Psychologie, den Sozialwissenschaften und anderen Gebieten. Generell gesagt: Wenn man einmal die Atome eines Systems und deren Beziehungen untereinander definiert hat, dann kann man alles Weitere, das man zum Verständnis des Systems benötigt, durch seine »Funktion«, das heißt seine Wirkungsweise für die Veränderung dieser Beziehungen, einführen.

Wissenschaft, Welterkenntnis und Wahrscheinlichkeiten

Die beiden bisher besprochenen Prinzipien – die Welt ist aus Elementarteilchen zusammengesetzt, und für ihre Bewegung gelten Gesetze, in die Parameter für jedes Teilchen eingehen – genügen noch nicht, um zu verstehen, wie die Physik zu Wissen über die Natur gelangt. Fundamentale physikalische Gesetze wie das Gravitationsgesetz sind nämlich universell. Sie gelten für jedes Objekt in der Welt. Mehr noch: Sie setzen jedes Objekt mit jedem anderen in Beziehung. So hängt in der newtonschen Mechanik die Gravitationsbeschleunigung, die ein Objekt zu einer Zeit auf Grund seiner Masse erfährt, von den Orten und Massen aller anderen Körper im Universum zur selben Zeit ab. In der Relativitätstheorie ist zwar die Ausbreitung von Wirkungen durch die Lichtgeschwindigkeit begrenzt; also hat nicht die ganze restliche Welt Auswirkungen auf ein Objekt, sondern nur alle Gegenstände, von denen aus das Licht genug Zeit hatte, bis zum Studienobjekt zu gelangen. Aber auch dieser »Vergangenheits-Lichtkegel«

ist für uns größtenteils nicht erfassbar. In der Quantenphysik treten dann wieder Korrelationen auf, die unabhängig von der Lichtgeschwindigkeit sind, nämlich die Einstein-Podolsky-Rosen-(EPR)-Korrelationen; das ist die berühmt-berüchtigte Nichtlokalität der Quantenphysik (*Spektrum* Februar 2017, S. 12).

Zugespißt gesagt: Universelle Gesetze sind als solche nutzlos. Wir können sie nicht überprüfen, weil wir nicht die Anfangsbedingungen für das gesamte Universum kennen können. Wir müssen sie daher so formulieren, dass sie auch auf eng begrenzte Systeme im Universum, die wir manipulieren können, anwendbar sind. Und eine solche Formulierung müssen die Gesetze auch zulassen! Wir müssen also voraussetzen, dass die Natur es uns erlaubt, Systeme isoliert zu beschreiben, so dass es möglich ist, von den äußeren Einflüssen auf das System abzusehen. Wir sind nur deshalb fähig, die Bahn eines auf die Erde fallenden Steins zu bestimmen, weil nach dem Gravitationsgesetz der Einfluss der Massen aller Sterne vernachlässigbar gering ist. Die Nichtlokalität der Quanten-

Universelle Gesetze sind als solche nutzlos. Man muss sie auch nichtuniversell anwenden können

physik kann man nur nachweisen, wenn man zwei Systeme so isolieren kann, dass man nur die EPR-Korrelationen zwischen diesen beiden Systemen erforscht, aber keine nennenswerten EPR-Korrelationen mit deren Umgebung bestehen.

In vielen Fällen gelingt diese Isolierung allerdings nicht. Obendrein kann die Vorhersage eines Ereignisses schon daran scheitern, dass wir die Anfangsbedingungen nicht genau genug kennen, selbst wenn sie nicht in der kosmischen Vergangenheit, sondern buchstäblich vor unseren Augen liegen. Das klassische Beispiel ist der Münzwurf. Wir können nicht sagen, ob beim nächsten Wurf Kopf oder Zahl fallen wird. Immerhin können wir die Aussage treffen, dass auf die Dauer Kopf und Zahl annähernd gleich häufig fallen werden. Ein universelles Naturgesetz muss also nicht nur auf begrenzte Systeme innerhalb des Universums anwendbar sein, sondern auch eine Antwort auf folgende Frage zulassen: Welche Zeitentwicklung eines uns zugänglichen Systems können wir typischerweise erwarten unter Unkenntnis der exakten Anfangsbedingungen? Wir wollen auch aus einer deterministischen Theorie wie der klassischen Mechanik Wahrscheinlichkeitsaussagen gewinnen. In der Tat leben wir in einer Welt, in der sozusagen die Münzwürfe häufiger oder zumindest bedeutender sind als die Steinwürfe. Ein ganzes Teilgebiet der Mathematik, die Theorie der dynamischen Systeme (»Chaostheorie«), befasst sich mit den Aussagen, die in dieser Situation – kleinste Veränderungen in den Anfangsbedingungen führen zu großen Divergenzen in den Resultaten – noch möglich sind.

In der Quantenphysik ist dann die Unsicherheit, die wir beim Münzwurf hinnehmen müssen, die Standardsituation. Deshalb können wir nur Aussagen über Häufigkeitsverteilungen von Messergebnissen machen, aber in der Regel keine Prognosen einzelner Ergebnisse. Dennoch liegt diesen Häufigkeitsverteilungen ein Gesetz zu Grunde.

Wenn man das oben beschriebene Denkmuster der Physik auf die Biologie, die Psychologie oder die Sozialwissenschaften anwendet, kommt man zwar ebenfalls zu Gesetzen, zum Beispiel dass der Genotyp den Phänotyp in gewisser Hinsicht bestimmt. Diese gelten allerdings mit der Einschränkung, dass in der Umgebung der betrachteten Systeme normale Bedingungen herrschen, und erlauben in der Regel nur Wahrscheinlichkeitsaussagen, weil wir die Anfangsbedingungen der betrachteten Systeme nicht genau kontrollieren können oder wollen.

Vier Faktoren sind somit für naturwissenschaftliches Wissen erforderlich:

- eine Hypothese über die Zusammensetzung der betrachteten Systeme;
- Parameter, die durch ihre Funktion im Sinne ihrer Wirkungsweise für die betrachteten Systeme eingeführt werden und dadurch die Formulierung von Gesetzen ermöglichen;
- die Definition von Bedingungen, unter denen die Gesetze auf uns zugängliche Systeme unter Absehen vom Einfluss der Umgebung angewendet werden können;
- die Formulierung von Bedingungen, unter denen man mit Hilfe der Gesetze Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Zeitentwicklung der betrachteten Systeme in Unkenntnis der exakten Anfangsbedingungen treffen kann.

Unter diesen Hypothesen ist die erste am stabilsten: Der Atomismus reicht von der vorsokratischen Naturphilosophie über die klassische Mechanik bis hin zur Quantenphysik (siehe »Was die Dinge sind«, S. 14). Was sich ändert – zum Teil drastisch, wie zum Beispiel im Übergang von der klassischen zur Quantenphysik –, das sind die Gesetze für die Zeitentwicklung der Elementarteilchen und die Weise, wie man aus diesen Gesetzen Wahrscheinlichkeitsaussagen über experimentelle Ergebnisse ableitet. Erst diese Ableitung ermöglicht die experimentelle Überprüfung der Theorie und damit auch ihre technische Anwendung.

Letztere ist allerdings nur ein Ziel der Wissenschaft. Und dieses Ziel erreicht man nicht, indem man sich nur auf anwendungsorientierte Forschung unter Ausklammerung von grundlegenden Fragen konzentriert. Ein Beispiel: Die Einwände Einsteins gegen die Kopenhagener Schule der Quantenmechanik sind rein erkenntnistheoretischer Natur. Einstein stellt nicht die bornsche Regel zur Berechnung der Häufigkeitsverteilungen von Messergebnissen in Frage (**Spektrum** September 2009, S. 30). Aber die mathematische Präzisierung dieser sehr grundlagenorientierten Einwände durch die bellschen Ungleichungen hat zum Nachweis der Quanten-Nichtlokalität geführt und damit das faszinierende Gebiet der Quanteninformatik eröffnet, das alle Aussichten bietet, binnen absehbarer Zeit zu sehr praktischen Anwendungen zu führen, namentlich zum Quantencomputer.

Was sagt uns das naturwissenschaftliche Wissen, das auf die beschriebene Weise gewonnen wird? Sind die naturwissenschaftlichen Theorien wahr? Diese Frage würde ein Physiker im Prinzip ohne zu zögern mit Ja beantworten – unter dem üblichen Vorbehalt, dass alle Theorien falsifizierbar und damit vorläufig sein müssen. Aber für »annähernd wahr« hält er seine Theorien auf jeden Fall. Das ist die Position des wissenschaftlichen Realismus (siehe »Die wesentlichen Positionen zur Wahrheit in der Wissenschaft«, S. 18).

Was ist Wahrheit?

Man kann Wahrheit allerdings nicht definieren: Bei jedem Kriterium, das jemand für Wahrheit vorschlägt, kann man ihn sinnvollerweise fragen, wieso eine Theorie, die das betreffende Kriterium erfüllt, wahr sein soll. Ist eine Theorie wahr, weil sie Dinge und Ereignisse in der Welt abbildet? Diese Behauptung, die so genannte Korrespondenztheorie der Wahrheit, ist nicht nachprüfbar, denn die Welt besteht nicht aus mathematischen Gleichungen, und eine Theorie ist keine Fotografie der Welt. Man kann nur sagen, dass dann, wenn eine Theorie wahr ist, es etwas in der Welt gibt, auf Grund dessen die Theorie wahr ist – die Theorie also etwas in der Welt, dessen Beschaffenheit und Verhalten, erfasst. So ist das Gravitationsgesetz wahr, weil es die Bewegungen eines Steins, den ich werfe, ebenso wie die der Planeten korrekt beschreibt; aber das Gesetz ist keine Abbildung dieser Objekte und ihrer Bewegungen. Hier ist »Abbildung« im mathematischen Sinn zu verstehen. Es gibt keine eindeutige Zuordnung, die von den Beobachtungen der Bewegungen zum Gravitationsgesetz führen würde.

Für den wissenschaftlichen Realismus spricht, dass er innerhalb unseres Systems des Wissens keine Grenze akzeptiert. Jede solche Grenze ist willkürlich. Der Empirismus zieht eine Grenze zwischen dem Beobachtbaren und dem Unbeobachtbaren; den Realismus akzeptiert er nur in Bezug auf Ersteres. Aber was beobachtbar ist, wandelt sich durch wissenschaftlichen Fortschritt. Elektronen gelten mittlerweile als beobachtbar, obwohl wir sie nach wie vor nicht sehen können, weil wir gewisse Messgeräte als Ersatz für unsere Augen akzeptieren. Ferner können wir Dinge manipulieren, ohne sie direkt zu beobachten. So sagt der kanadische Wissenschaftsphilosoph Ian Hacking in Bezug auf ein Experiment mit Elektronen, bei dem Ladungsträger auf eine supraleitende Kugel aufgesprüht wurden: »If you can spray them, they are real.«

Noch willkürlicher ist der Konstruktivismus (siehe »Die wesentlichen Positionen zur Wahrheit in der Wissenschaft«, S. 18): Es gibt keine frei schwebenden Geister oder Gehirne oder Diskurse oder sozialen Gemeinschaften. Woher kommt das Material, aus dem der Geist, das Gehirn, der Diskurs oder die soziale Gemeinschaft sich ihre Welt konstruiert? An dieser Stelle ist der Konstruktivismus der wissenschaftlichen Erklärung der Welt durch ein Theoriegebilde aus den vier oben genannten Faktoren weit unterlegen. Es ist die interne Kohärenz (die Kombination aus Einfachheit und Informationsreichtum) dieses Theoriegebildes plus die empirische Überprüfbarkeit, welche die

Wissenschaft allen anderen Erklärungsversuchen der Welt so überlegen macht.

Es ergibt daher keinen Sinn, in Bezug auf einzelne herausgegriffene Elemente des wissenschaftlichen Theoriegebildes Realist zu sein und dasselbe in Bezug auf andere Elemente zu verweigern. Man kann zum Beispiel nicht Realist sein in Bezug auf die physikalischen Reaktionen, welche die Funktionsweise von Atomkraftwerken ausmachen, und Konstruktivist, wenn es um die physikalischen Reaktionen geht, die zur Erderwärmung infolge des Gebrauchs fossiler Brennstoffe führen. Beide Sorten Reaktionen sind untrennbare Bestandteile eines einheitlichen Theoriegebäudes; es ist logisch unmöglich, die Physik eines Kernkraftwerks für real zu halten und die Physik des Klimawandels für eine gesellschaftliche Verein-

Was Wissenschaft auszeichnet

Objektivität: Wissenschaftliche Erkenntnisse sind von einem Standpunkt aus formuliert, der unabhängig von Geschlecht, Rasse, Religion, geografischer oder zeitlicher Position ist. Sie sind daher jedem zugänglich, der die wissenschaftliche Sprache erlernt hat.

Systematizität: Wissenschaftliche Theorien versuchen, so viele Phänomene wie möglich mit einem Gesetz, das so einfach ist wie möglich, zu repräsentieren.

Experiment: Ein Gesetz ist erst dann anerkannt, wenn mit seiner Hilfe Voraussagen über neue Phänomene formuliert werden, die sich durch Beobachtung oder Experiment bestätigen lassen.

barung (oder gar eine politisch motivierte Verschwörung). Wer in dieser Hinsicht Konstruktivist ist, schadet sogar der Menschheit – auch wenn der größte Schaden voraussichtlich nicht die westlichen Industrienationen und nicht die heute lebende Generation trifft.

In der wissenschaftlichen Theoriebildung geht es um die optimale Kombination von Einfachheit und Informationsreichtum in Bezug auf die verfügbaren Daten (die sich ständig erweitern). Die vier genannten Faktoren werden so eingesetzt, dass man mit ihnen einfache Regeln formulieren kann, die einen möglichst weiten Bereich von Phänomenen abdecken und diesen Bereich so beschreiben, dass die Regeln auch auf eng begrenzte Systeme anwendbar sind, die wir manipulieren können. Ein Paradebeispiel hierfür ist wiederum Newtons Gravitationsgesetz: Durch die Annahme der Zusammensetzung der Materie aus

Punktteilchen und durch das Zuordnen einer Masse zu diesen Punktteilchen gelingt es, ein einfaches Gesetz zu formulieren, das eine Vielzahl der Bewegungen im gesamten Universum erfasst, und zwar so, dass in vielen Fällen die Bewegungen zweier Körper relativ zueinander unter Absehen von deren Umgebung berechnet werden können. Hieraus speist sich das zentrale Argument für den wissenschaftlichen Realismus, formuliert von dem amerikanischen Philosophen Hilary Putnam (1926–2016): Der Realismus ist die einzige Position, die den Erfolg der Wissenschaft in der Erklärung und Vorhersage neuer Phänomene nicht zu einem Wunder erklären muss. (»The positive argument for realism is that it is the only philosophy that does not make the success of science a miracle.«)

Der physikalische Determinismus sagt nichts über den freien Willen aus

Bei allen guten Gründen für den wissenschaftlichen Realismus muss man sich auch die Grenzen des naturwissenschaftlichen Wissens bewusst machen. Dazu zum Abschluss zwei Beispiele.

Es gibt einen klaren Grund, in der wissenschaftlichen Theoriebildung deterministische Gesetze zu bevorzugen. Sie erreichen ein Optimum an Einfachheit und Informationsreichtum: Gegeben beliebige Anfangsbedingungen, ist in einer einzigen mathematischen Gleichung die gesamte vergangene und zukünftige Entwicklung des betrachteten Systems erfasst. Newtons Gravitationsgesetz ist wiederum Paradebeispiel für ein solches Gesetz; auch in der Quantenphysik kann man deterministische Gesetze formulieren, aus denen die Bornsche Regel zur Berechnung von Häufigkeitsverteilungen von Messergebnissen hervorgeht. Unter stabilen Umweltbedingungen könnte man auch in der Biologie und sogar in der Psychologie und in den Sozialwissenschaften deterministische Gesetze konzipieren.

Nehmen wir daher einmal an, dass ein physikalischer Determinismus wahr ist und vielleicht auch ein biologischer (etwa ein genetischer). Selbst wenn dem so wäre, folgt daraus nichts für unsere Freiheit (den freien Willen), sondern nur, dass grundlegende physikalische Prozesse – und vielleicht auch biologische, wie die Entwicklung vom Gen zum Phänotyp – immer in der gleichen, einfachen Regelmäßigkeit ablaufen. Aber daraus folgt nicht, dass das Gesetz – oder irgendetwas in der Welt, auf welches es sich bezieht – die Dinge dazu zwingt, sich in einer bestimmten Weise und nicht anders zu verhalten. Kurz: Physikalischer oder auch biologischer Determinismus sagt über unseren freien Willen gar nichts aus. Nur wenn man metaphysische Prämissen über eine Art von Zwang oder Notwendigkeit in der Natur in die Interpretation der naturwissenschaftlichen Gesetzesaussagen hineinsteckt, kann man Konsequenzen, die mit der menschlichen Freiheit in Konflikt geraten, aus diesen Gesetzesaussagen herausbekommen.

Zweites Beispiel: Wenn man, wie oben ausgeführt, eine Hypothese über die elementaren Objekte hat, aus denen alles zusammengesetzt ist, kann man alles Weitere in Begriffen der Wirkungsweise für deren Verhalten einführen – also zum Beispiel alles Biologische funktional letzt-

Die wesentlichen Positionen zur Wahrheit in der Wissenschaft

Realismus: Wissenschaftliche Theorien beschreiben die Welt so, wie sie ist, oder nähern sich einer solchen Beschreibung zumindest an: »Es gibt Elektronen.«

Empirismus: Die Beobachtungsaussagen in wissenschaftlichen Theorien beschreiben die Welt so oder ungefähr so, wie sie ist. Nicht beobachtbare Dinge sind lediglich ein Hilfsmittel zur Formulierung von Beobachtungsaussagen: »Ich lasse mich nicht auf die Aussage ein, dass es Elektronen gibt. Man

kann sie schließlich nicht sehen. Aber mit Hilfe des Begriffs »Elektron« (und anderen) kann man hervorragend alles (und noch mehr) beschreiben, was man bei Blitzen, zu Spulen gewundenen Metalldrähten und geriebenem Bernstein beobachten kann.«

Konstruktivismus: Wissenschaftliche Theorien beschreiben nicht die Welt, wie sie ist, sondern Konstruktionen, die vom cartesischen Ego, Geistern, Gehirnen, Diskursen oder sozialen Gruppen vorgenom-

men werden: »Wir können nicht wissen, ob der Begriff »Elektron« eine Entsprechung in der Realität hat. Die Physiker haben sich im Diskurs auf seine Verwendung geeinigt, weil er für ihre Zwecke – insbesondere die Beschreibung von Blitzen und so weiter – geeignet erscheint. Von dieser Zweckmäßigkeit abgesehen ist er philosophisch nicht besser als die konkurrierenden Vorstellungen von kontinuierlich verteilter elektrischer Ladung oder einem Geist in der Leidener Flasche.«

lich durch Änderungen in der räumlichen Anordnung der Elementarteilchen definieren. Das ist das Schema der funktionalen Reduktion, das auf David Lewis zurückgeht.

Dieses Schema ist formal auch auf alles, was den menschlichen Geist ausmacht, anwendbar – auf Sinneswahrnehmungen, Gedanken, Normen. So kann man die Wahrnehmung von etwas Rotem oder das Schmerzgefühl funktional durch ihre Auswirkungen auf das Verhalten des Wahrnehmenden definieren (zum Beispiel Stimulation oder Abwehrreaktion), aber es ist fraglich, ob die funktionale Definition den phänomenalen Gehalt dieser Erlebnisse erfasst. Allein aus der Möglichkeit einer funktionalen Definition folgt also nicht, dass man den menschlichen Geist naturwissenschaftlich verstanden hat.

Durch naturwissenschaftliche – einschließlich neurowissenschaftlicher – Forschung lässt sich das cartesische Erbe nicht abschütteln. Descartes verbannt alles, was mit Sinnesqualitäten (wie Farben und Töne), Bewusstsein, Intentionalität und Normen zu tun hat, aus der Natur und definiert diese allein durch Ausdehnung und Bewegung; dadurch ebnet er den Weg für die naturwissenschaftliche Theoriebildung durch Zusammensetzung, Wirkungsweise und Wahrscheinlichkeitsmaß. Alles, was Sinnesqualitäten, Bewusstsein, Intentionalität, Normen betrifft, ist nicht in der Natur, sondern allein im menschlichen Geist verankert. Es kommt in der Aktivität des Denkens zum Ausdruck, einschließlich der naturwissenschaftlichen Theoriebildung. Daraus folgt aber, dass es nicht eine Frage des Fortschritts innerhalb der naturwissenschaftlichen Theoriebildung als solcher sein kann, ob der Geist sich ebenfalls funktional im genannten Sinne erklären lässt. Wiederum gilt: Nur wenn man die metaphysische Prämisse hineinsteckt, dass auch der menschliche Geist, der das naturwissenschaftliche Erklärungsschema entwickelt, durch ebendieses Erklä-

rungsschema verstanden werden kann, bekommt man das diesbezügliche Resultat heraus, indem man die Merkmale des Geistigen entsprechend funktional definiert. Für diese metaphysische Prämisse mag es gute Gründe geben; aber die kommen nicht aus dem naturwissenschaftlichen Fortschritt, sondern aus der Philosophie. Das naturwissenschaftliche Wissen als solches kann nicht den Geist, der dieses Wissen hervorbringt, erfassen.

Wissenschaft klärt auf und befreit dadurch. Indem Descartes die Natur allein durch Ausdehnung und Bewegung charakterisiert und diese Charakterisierung durch den Erfolg der Naturwissenschaft bestätigt wird, befreit er uns unter anderem von der Projektion von Normen auf die Natur. Daraus folgt: Die Natur gibt uns nicht die Normen für die Gestaltung des menschlichen Lebens und Zusammenlebens vor. Mit dieser Freiheit haben wir aber auch die Verantwortung, diese Normen selbst zu setzen. Der Verweis auf die Ergebnisse naturwissenschaftlicher Forschung (einschließlich evolutionsbiologischer Forschung) kann uns diese Verantwortung nicht abnehmen. Nur wenn man den Wahrheitsgehalt der Wissenschaft anerkennt, der durch ihren Erfolg begründet ist, kann man die Wissenschaft einsetzen zur Verbesserung der menschlichen – einschließlich der gesellschaftlichen – Lebensumstände. Und nur wenn man ihre Grenzen anerkennt, ist man gegen die Versuchung gewappnet, Wissenschaft ideologisch zu missbrauchen, sei es krude in biologischen Rassen- oder darwinistischen Sozialtheorien, sei es ausgeklügelt in den verschiedenen Formen totalitärer Gesellschaftsgestaltungen. ◀

QUELLE

Esfeld, M., Deckert, D.-A.: A Minimalist Ontology of the Natural World. Erscheint im Herbst 2017 bei Routledge, New York

INTERVIEW

»ICH SCHÄTZE DIE ANARCHIE IN DER WISSENSCHAFT«

Der Aachener Physiker Michael Krämer sucht am Genfer Teilchenbeschleuniger LHC nach neuen Naturgesetzen. Ein Gespräch über die aufwändige Suche nach Erkenntnis, den Wert philosophischen Reflektierens und die größten offenen Fragen der Physik.

» spektrum.de/artikel/1478203

Herr Professor Krämer, 2012 haben Physiker am Large Hadron Collider (LHC) am Genfer Kernforschungszentrum CERN ein neues Elementarteilchen entdeckt. Sie und Ihre Kollegen halten es für das Higgs-Teilchen, den letzten fehlenden Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik, das die Kräfte und Teilchen im Mikrokosmos beschreibt. Wie sicher sind Sie sich?

Erst einmal würde ich sagen, dass wir *ein* Higgs-Teilchen gefunden haben. Möglicherweise ist es nicht *das* Higgs-Teilchen des Standardmodells, beziehungsweise vielleicht gibt es noch weitere Higgs-Teilchen, die dann aber von einer anderen Theorie als dem Standardmodell beschrieben werden. Zu der Frage, wie sicher ich mir bin: Ich habe Vertrauen in die Qualitätskontrolle am LHC.

Wie muss man sich diese vorstellen?

An den Analysen arbeiten tausende Wissenschaftler. Jede wichtige Frage wird von mehreren Gruppen untersucht, die sich in einem internen Wettstreit miteinander befinden. Am Ende setzt sich die gründlichere und solidere Analyse durch. An der Suche nach dem Higgs-Teilchen waren außerdem zwei Detektoren beteiligt, ATLAS und CMS, die mit verschiedenen Mannschaften und Herangehensweisen zum selben Ergebnis kamen.

Wie gelangen Forscher denn überhaupt zu Erkenntnissen wie dem Higgs-Teilchen?

Für mich ist der wichtigste Schritt das Wechselspiel zwischen Experiment und Theorie. Einerseits lassen wir im Kreistunnel des LHC Protonen kollidieren und messen, wie viele und welche Teilchen bei den Zusammenstößen entstehen und in welche Richtung sie davonfliegen. Das ist die empirische Beobachtung. Im nächsten Schritt versuchen wir, diese Beobachtung mit Hilfe der theoretischen Physik zu interpretieren. Wenn das, was wir

sehen, nicht zu unserer Theorie passt, erarbeiten wir neue Modelle. So kommen wir idealerweise neuen physikalischen Phänomenen auf die Spur.

Inwiefern unterscheidet sich der LHC dabei von anderen Experimenten?

Sowohl die Detektoren des LHC als auch die Daten, die sie aufzeichnen, sind extrem komplex. Es ist sehr aufwändig, auf Basis der elektronischen Signale, die nach einer Proton-Proton-Kollision registriert werden, zu sagen, welche Teilchen da nun davonfliegen. Man benötigt etliche Schritte, um aus den rohen Daten etwas abzuleiten, das sich mit den Vorhersagen der Theorie vergleichen lässt.

Das klingt so, als müssten Außenstehende darauf vertrauen, dass Sie und Ihre Kollegen ordentlich arbeiten. Was entgegenn Sie Leuten, die nicht an das Higgs-Teilchen glauben und es beispielsweise für eine Fälschung halten?

Ich kann mir nicht vorstellen, wie solch ein Komplott über einen längeren Zeitraum Bestand haben könnte. Natürlich gibt es in der Wissenschaft Dinge, die falsch präsentiert wurden, es gibt Forschungsskandale und Fälschungen. Aber wir haben ja keine politische Agenda, die wir verfolgen und in deren Interesse es ist, der Öffentlichkeit die Entdeckung eines neuen Teilchens vorzugaukeln.

Aber Sie wollen doch alle den nächsten, größeren Beschleuniger bauen, wobei eine Teilchenentdeckung zweifellos helfen würde.

Natürlich haben wir gemeinsame Ziele. Da treten wir auch geschlossen auf. Doch was die wissenschaftlichen Inhalte angeht, sind wir eine heterogene Gemeinschaft mit unterschiedlichen Strömungen. Wenn Sie mit Teilchenphysikern sprechen, dann hat jeder andere Ideen – und

will, dass sie sich durchsetzen. Dieser Wettstreit entlarvt Fehlinterpretationen, was uns der Wahrheit letztlich näher bringt.

Welche Rolle spielen soziologische Faktoren? Als Wissenschaftler wollen Sie den nächsten Forschungsantrag genehmigt bekommen, zu Konferenzen eingeladen werden und Drittmittel einwerben. Begünstigt das Konformismus, gerade bei so großen Communitys wie dem LHC?

Es stimmt, dass man insbesondere in Drittmittelprojekten oft Themen bearbeitet, die entlang des wissenschaftlichen Mainstreams laufen. Auch der Wettbewerb zwischen Universitäten trägt dazu bei. In welche Richtungen geforscht wird, wird zum Teil von außerhalb der Wissenschaft vorgegeben, etwa von der EU oder vom deutschen Forschungsministerium. Da werden Schwerpunkte gesetzt, häufig auch aus guten Gründen. Manchmal denke ich schon: Wenn ich Fördergelder möchte, muss ich bei diesen Dingen mitmachen.

Würden Sie sagen, dass die Ökonomisierung des Wissenschaftsbetriebs das Streben nach Erkenntnis erschwert?

Ich denke, sie hat einen Einfluss, macht aber die Suche nicht kaputt. Das, was ich beschrieben habe, kann zwar

eine selbstverstärkende Wirkung haben, die nicht nur positiv ist. Dennoch gibt es nach wie vor viele Wissenschaftler, die unorthodox denken oder neben konventionellen auch exotische, etwas verrückte Forschungsideen verfolgen. Je älter ich werde, desto mehr schätze ich diese Anarchie in der Wissenschaft.

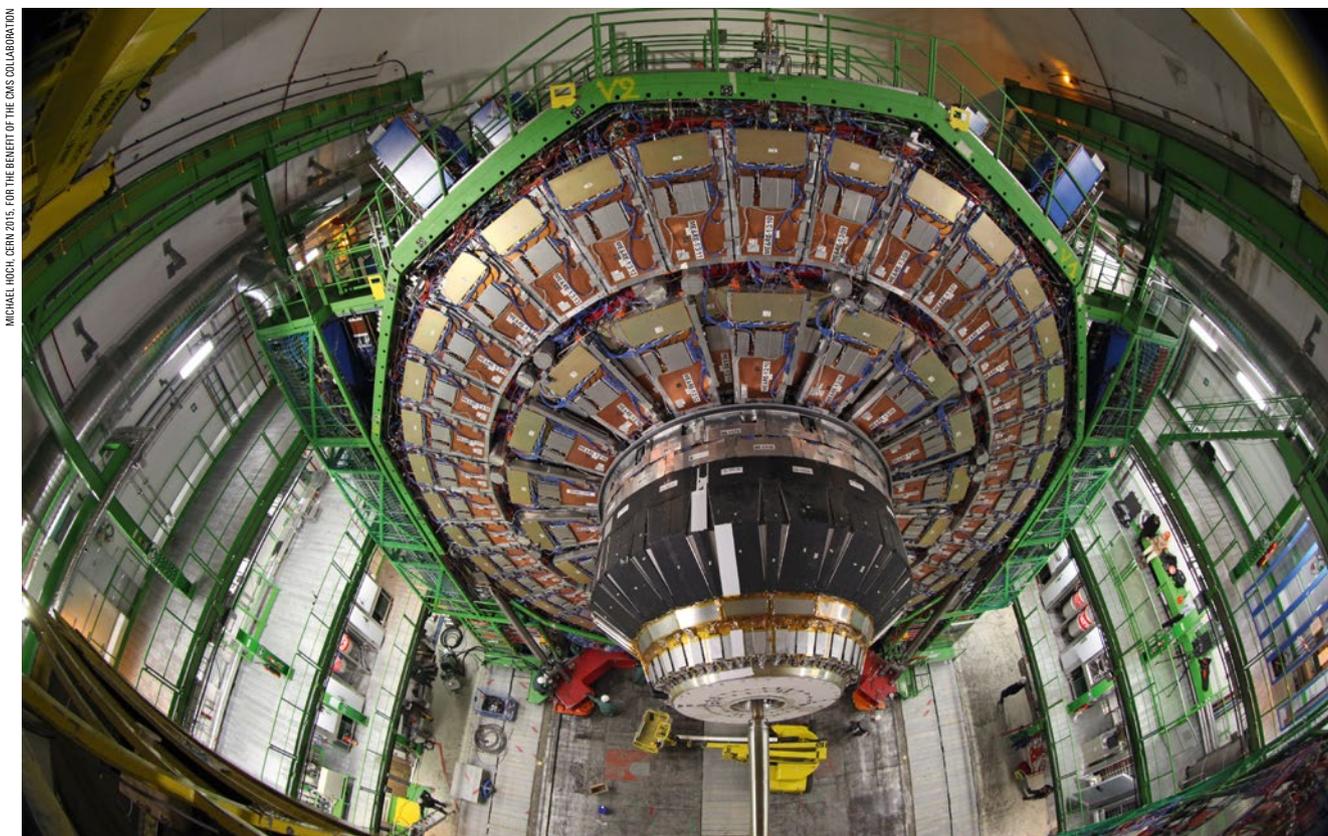
Sie sind an einem vor Kurzem gestarteten, an der Universität Wuppertal angesiedelten Projekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) beteiligt, in dem Philosophen, Teilchenphysiker, Historiker und Soziologen gemeinsam die Vorgänge am LHC analysieren. Was erhoffen Sie sich davon?

Ich finde, wir Physiker können eine philosophische Reflexion gut gebrauchen. Und der LHC ist dazu prädestiniert: Es ist das zentrale Experiment der modernen Teilchenphysik. Seine Komplexität wirft Fragen auf, die man in der Wissenschaftsphilosophie bisher nicht beleuchtet hat. Die wissenschaftliche Praxis hat sich durch die komplexen, großen Experimente unglaublich gewandelt.

Woran denken Sie konkret?

Beispielsweise an die künstliche Intelligenz, die seit einigen Jahren in der Datenanalyse am LHC zum Einsatz kommt. Man nutzt Verfahren aus der Bilderkennung, um teilchenphysikalische Prozesse zu analysieren, lässt also

In der 27 Kilometer langen Vakuumröhre des Large Hadron Collider nördlich von Genf rasen annähernd lichtschnelle Protonen ineinander. Unter anderem mit dem haushohen CMS-Detektor (Foto) untersuchen Physiker, was bei diesen Teilchen-Kollisionen passiert.



MICHAEL HOCH, CERN 2015. FOR THE BENEFIT OF THE CMS COLLABORATION



MIT FRIEDRICH VON MICHAEL KRÄMER

Michael Krämer

ist Professor für theoretische Teilchenphysik an der RWTH Aachen. Den Schwerpunkt seiner Arbeit bildet die Suche nach neuen physikalischen Phänomenen in den Daten des Genfer Teilchenbeschleunigers LHC. Daneben beschäftigt er sich mit Wissenschaftsphilosophie, unter anderem in einem Projekt, das die Erkenntnistheorie des LHC erforscht. Er ist außerdem Sprecher der DFG-Gruppe »Neue Physik am LHC«.

etwa ein neuronales Netz auf einen Satz von Daten los, und das Netz trainiert sich selbst. Und am Ende spuckt es aus, man habe ein neues Phänomen entdeckt. Was macht man damit? Das finde ich sehr spannend, weil es eine ganz neue Art des Erkenntnisgewinns ist.

Birgt das nicht auch die Gefahr, blind der Maschine zu vertrauen? In einem der sechs Teilprojekte des Philosophie-Vorhabens geht es unter anderem um »epistemisches Risiko«. Sie meinen damit, dass man etwas in der Datenanalyse übersehen könnte und deshalb zu falschen Ergebnissen kommt.

Ja, von den Rohdaten zum Wirkungsquerschnitt einer Reaktion, also der abgeleiteten Wahrscheinlichkeit, dass diese Reaktion stattfindet, ist es wie gesagt ein langer Weg. Irgendwo könnte es noch systematische Fehler geben. Im Vorfeld der eigentlichen Experimente wird beispielsweise zur Kalibration der Detektoren viel mit Testmessungen gearbeitet. Aber an einigen Punkten verlässt man sich auf Computersimulationen, um Vorhersagen zum Detektorverhalten in Energiebereichen zu erhalten, die experimentell zunächst nicht zugänglich sind. Damit könnte man sich Probleme einhandeln.

Wollen Sie das Risiko dafür quantifizieren?

Die Teilchenphysiker, die diese Analysen machen, versuchen bereits, diese Unsicherheit abzuschätzen. Wir wollen eher verstehen, an welchen Stellen etwas passiert, was man sich vielleicht näher anschauen sollte. Außerdem interessiert uns, wie die Kollegen eigentlich mit diesen systematischen Unsicherheiten umgehen.

Gibt es denn Präzedenzfälle für systematische Fehler, die man lange übersehen hat?

Am Tevatron in der Nähe von Chicago gab es Ende der

1990er Jahre eine Messung, die sich um die Produktion schwerer Quarks drehte. Die Ergebnisse deuteten auf neue Naturgesetze hin. Aber am Ende hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass die Modelle, die man benutzt hatte, für diesen Energiebereich nicht stimmten. Letztlich hat man das korrigiert – weil es Leute gab, die kritisch geblieben sind.

Am Ende Ihres Epistemologie-Projekts werden Sie vielleicht ähnliche Schwachstellen am LHC entdeckt haben ...

Ich denke nicht, dass wir etwas finden, was die Teilchenphysik revolutioniert. Die mit der Datenanalyse betrauten Kollegen arbeiten sehr gründlich. Wir haben auch nicht den Anspruch, den Physikern zu sagen: So und so sollt ihr es machen. Ich glaube, der Nutzen für die Forscher wird eher auf einer individuellen Basis liegen. Für mich persönlich jedenfalls ist es ein großer Gewinn, zu reflektieren, was ich mache und warum ich es mache.

Können Sie ein Beispiel nennen?

In der Teilchenphysik gibt es bestimmte Begriffe und Probleme, die man lösen will, um voranzukommen. Ich denke da zum Beispiel an das Hierarchie-Problem. Heute sehe ich es als Motivation für neue Physik eher kritisch – vor zehn Jahren war das noch anders.

Was hat es mit dem Hierarchie-Problem denn auf sich?

Viele meiner Kollegen denken, dass der Higgs-Mechanismus, der vielen Elementarteilchen eine Masse gibt, unnatürlich ist. Genauer: Wenn man versucht, die Masse des Higgs-Teilchens zu berechnen, treten sehr große Korrekturterme auf. Physikalisch entsprechen diese Terme Quantenfluktuationen, die einen wichtigen Einfluss auf die Masse

des Higgs-Teilchens haben. Sie reagieren sehr empfindlich auf das, was bei sehr hohen Energien passiert, wie sie kurz nach dem Urknall im Universum vorherrschten.

Wieso ist das ein Problem?

Wenn ich die physikalischen Gesetze bei sehr hohen Energien leicht verändere, dann scheint das einen riesigen Effekt auf das zu haben, was ich in den Berechnungen als Higgs-Masse erhalte. Eigentlich würde man denken, dass man das, was bei großen Skalen passiert, gut von dem trennen kann, was bei kleinen Skalen passiert. Wenn ich beispielsweise beschreiben will, wie sich der Mond um die Erde dreht, muss ich nicht im Detail wissen, wie Quarks in Atomkernen zusammenspielen. Das ist schon ein sehr grundlegendes Prinzip in der Physik.

Aber im Fall des Higgs-Teilchens steht es plötzlich in Frage?

Genau. Den Messungen am LHC zufolge hat es eine Masse von etwa 125 Gigaelektronvolt/c². Die Masse fällt also in den Bereich der elektroschwachen Energieskala, die in den Kollisionen am LHC erreicht wird und die 16 Zehnerpotenzen unterhalb der so genannten Planck-Skala liegt, der höchsten Energieskala, die die Größe der vorhin erwähnten Quantenfluktuationen zu bestimmen scheint.

Das Higgs-Teilchen müsste also eigentlich viel schwerer sein – und irgendetwas senkt seine Masse.

Ja, wir vermuten, dass dafür ein bisher unbekannter Mechanismus verantwortlich ist. Er kompensiert den Effekt der Energiefluktuationen auf das Higgs-Teilchen. Eine mögliche Lösung wäre die Supersymmetrie ...

... eine ambitionierte Erweiterung des Standardmodells, die Physiker in den 1980er Jahren entwickelt haben, um das Hierarchie-Problem zu lösen.

Sie würde erklären, wieso diese großen Quantenfluktuationen nicht auftreten: Sie werden gerade kompensiert, wofür eine neue Symmetrie verantwortlich ist. Viele Physiker, zu denen auch ich zähle, finden diese Lösung sehr reizvoll, weil Symmetrien in der Beschreibung der Natur eine wichtige Rolle spielen, wie viele Beispiele aus der Teilchenphysik zeigen.

Es müsste demnach zu jedem Elementarteilchen ein supersymmetrisches Partnerteilchen geben. Von diesen sind am LHC aber bisher keine aufgetaucht.

Hat sich die Teilchenphysik in ihrem Streben, das Hierarchie-Problem zu lösen, ein wenig verrannt?

Es stimmt, dass Motivationen wie das Hierarchie-Problem häufig ein wenig unreflektiert von der Forschungsgemeinschaft genutzt werden. Natürlich hoffen wir, irgendeine Erklärung für den beobachteten Wert der Higgs-Masse zu finden. Und ja, dadurch, dass wir keine neue Physik an der elektroschwachen Skala gefunden haben, kann man prinzipiell sagen: Vielleicht war das Hierarchie-Problem keine so gute Motivation für die Suche nach neuen Naturphänomenen.

Bevor der LHC 2010 anlief, haben Kollegen von Ihnen gesagt: Das Albtraum-Szenario wäre, wenn am LHC außer dem Higgs keine neuen Teilchen auftauchen. Momentan sieht es so aus, als würde dieses Szenario eintreten.

Wir befinden uns in einer schwierigen, aber auch interessanten Phase. Es herrscht nervöse Gespanntheit. Denn wir brauchen ein Signal aus den Daten des LHC, um zu wissen, in welche Richtung wir uns orientieren müssen. Das ist eine völlig andere Situation als vor fünf oder zehn Jahren. Da hätte Ihnen jeder gesagt: Na klar finden wir außer dem Higgs noch etwas Neues und Überraschendes am LHC. Dafür gab es so viele Argumente: das Hierarchie-Problem, die Supersymmetrie – und natürlich die Dunkle Materie.

Diese hypothetische Materieform soll den Raum zwischen den Sternen füllen – und durch ihre Schwerkraft die Bewegung von Galaxien und Galaxienhaufen antreiben. Wie passt sie ins Bild?

Viele meiner Kollegen aus der Astrophysik und der Kosmologie sind überzeugt davon, dass es sie gibt. Und ein neues, schweres und stabiles Teilchen, wie es zum Beispiel in der Supersymmetrie vorhergesagt wird, kann die Dunkle Materie überzeugend erklären. Das alles passte schon sehr gut zusammen. Daher hofften wir, am LHC sehr schnell supersymmetrische Teilchen zu finden.

Zur Enttäuschung vieler Physiker ist es anders gekommen. Wie geht es jetzt weiter?

Der LHC läuft noch eine ganze Weile. Wir sind dabei, die Vorhersagen für Standardmodell-Prozesse weiter zu verbessern, so dass man möglicherweise aus der Diskrepanz zwischen ihnen und den Ergebnissen der Experimente etwas über neue Physik lernen kann. Ganz konkret im Fall des Higgs-Bosons: Da will man alle Eigenschaften mit möglichst hoher Präzision bestimmen – vielleicht ergibt sich irgendwo eine Abweichung von den Vorhersagen.

Wie viel Raum sehen Sie denn noch für die Supersymmetrie, von der es ja viele Varianten gibt?

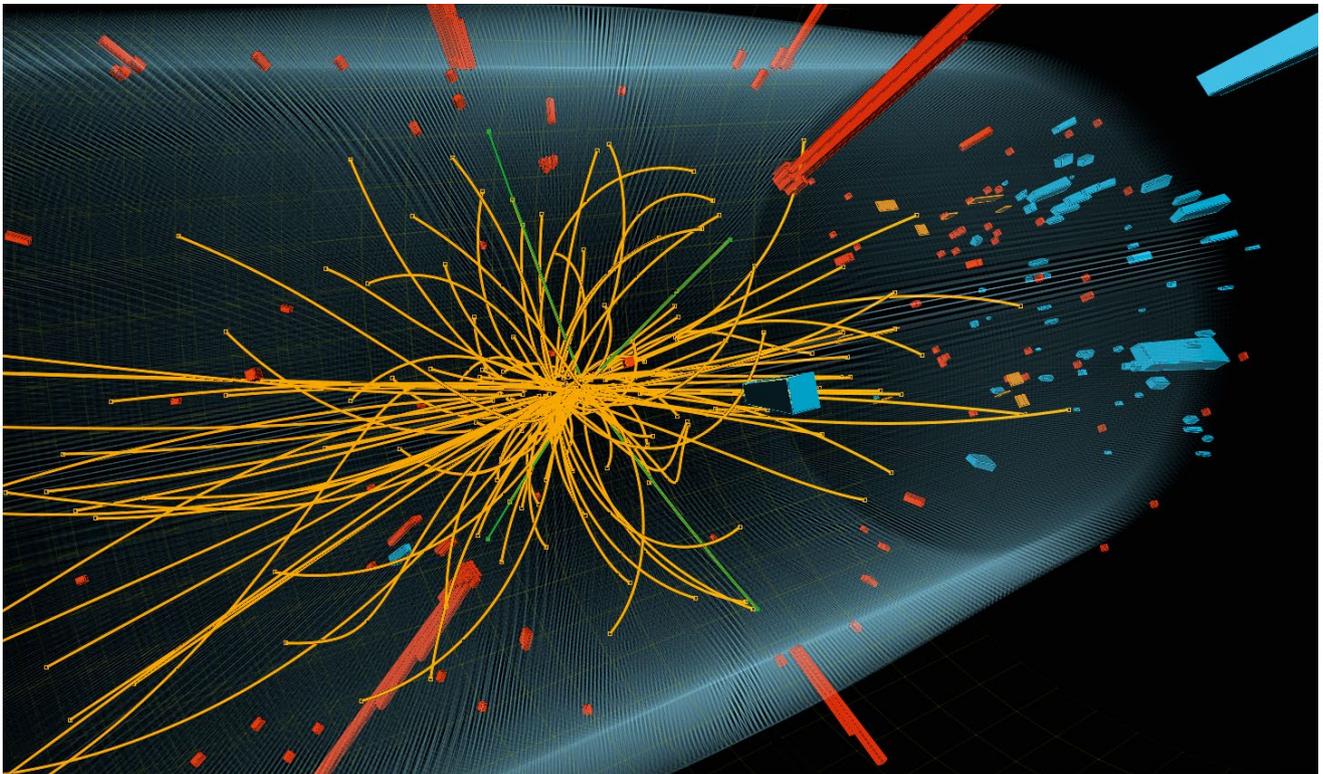
Man kann die Supersymmetrie mit dem LHC nicht völlig ausschließen. Vielleicht sind die Teilchen so schwer, dass die Energien des LHC dafür nicht ausreichen. Dann bleibt höchstens die Möglichkeit, dass man die neuen Teilchen eben indirekt sieht, etwa in vom Standardmodell abweichenden Zerfällen so genannter B-Mesonen oder im anomalen magnetischen Moment des Myons.

Die Supersymmetrie könnte also »just around the corner« bleiben, wo sie einige Ihrer Kollegen schon seit Jahrzehnten wännen?

Ja, es ist durchaus möglich, dass wir mit diesem Statement bis ans Ende unserer Tage leben müssen.

Würde die Supersymmetrie denn konzeptionell an Reiz verlieren, wenn am LHC keine Hinweise auf sie auftauchen?

Die Supersymmetrie als theoretisches Konzept bleibt weiter attraktiv. Aber irgendwann wird sie als Modell neuer



LUCAS TAYLOR & THOMAS MCCAULEY, CERN 2011. FOR THE BENEFIT OF THE CMS COLLABORATION (AUSCHNITT)

Mühsame Datenauswertung: Nach der Kollision von Protonen im CMS-Detektor fliegen zig andere Teilchen davon, wie diese Computeranimation zeigt.

Physik an der elektroschwachen Skala, die wir mit dem LHC untersuchen, uninteressant. Das Hierarchie-Problem ist hier in der Tat ein kritischer Aspekt. Wenn die Teilchen zu schwer werden, kann die Supersymmetrie es praktisch nicht mehr lösen. Zwar ist sie selbst in diesem Fall noch eine gut motivierte Theorie. Aber dann gibt es außer vielleicht der Dunklen Materie kein wirklich starkes Argument mehr dafür, dass sie für die Natur an der elektroschwachen Skala relevant ist.

Einige der einfachsten Supersymmetrie-Varianten wurden mittlerweile falsifiziert. Wie interessant sind die, die noch übrig sind?

Wenn ich mehr und mehr Schichten an Komplexität hinzufüge, um zu erklären, warum ich nichts gesehen habe, ist das natürlich nicht attraktiv. Dann muss ich schon einen sehr guten theoretischen Grund haben. Und den sieht man momentan nicht wirklich. Deshalb verliert die Supersymmetrie aus meiner Sicht derzeit auch ein bisschen an Reiz.

Ein Argument für die Supersymmetrie ist, dass sie drei der vier Naturkräfte auf eine übergeordnete Grundkraft zurückführen könnte. Läuft ihr Ausbleiben dem Bestreben Einsteins und vieler anderer Physiker zuwider, eine elegante, übergeordnete Theorie zu finden?

Die Vereinheitlichung der Naturgesetze ist immer noch unser Traum. Wir haben in der Teilchenphysik nach wie vor die Hoffnung, das Standardmodell durch eine neue

Struktur weiter vereinfachen zu können. Ohne neue physikalische Phänomene bleiben viele Fragen offen: Warum ist das Elektron so leicht und das Top-Quark so schwer? Warum gibt es drei Teilchen-Familien? Niemand kennt die Antwort. Aber jeder Teilchenphysiker denkt: Damit können wir uns nicht zufriedengeben.

Wenn die Supersymmetrie das Hierarchie-Problem nicht löst – wie kriegen Sie es denn sonst aus der Welt? Müssen Physiker vielleicht damit leben, dass die Natur nicht so elegant ist, wie sie es gerne hätten?

Ich hoffe, dass das alles Sinn ergibt, wenn wir irgendwann eine fundamentalere Theorie der Quantengravitation gefunden haben. Es könnte sein, dass wir irgendetwas im Bereich der Quantenfeldtheorie bei extrem hohen Skalen nicht richtig verstehen. Bei den Phänomenen, die mit dem Higgs-Teilchen zu tun haben, denkt man: Das ist doch irgendwie komisch. In allen anderen Bereichen des Standardmodells treten solche Sensitivitäten für die Physik größerer Skalen nicht auf. Aber was ist die Lösung? Sind es wirklich neue physikalische Gesetze an der elektroschwachen Skala? Ist es vielleicht eine Modifikation der Quantenfeldtheorie? Oder ist es etwas, was wir noch nicht einmal erahnen? Das ist derzeit offener als je zuvor.

Herr Professor Krämer, vielen Dank für das Gespräch. ◀

Die Fragen stellte **Robert Gast**,
Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

MATHEMATISCHE BIOLOGIE ZELLULÄRE AUTOMATEN IN DER NATUR

Ein höchst abstraktes Konzept findet sich überraschend in der Körperzeichnung eines Reptils wieder.

► Eigentlich sind zelluläre Automaten in den Köpfen der theoretischen Informatiker zu Hause. Sie bestehen aus lauter Exemplaren eines äußerst primitiven Automaten, die nur sehr wenige Zustände annehmen können – typischerweise zwei. Auf jedes Ticken einer gedachten Uhr ändert ein Automat seinen Zustand in Abhängigkeit von denen seiner unmittelbaren Nachbarn. Das ist alles.

Man pflegt den Gesamtzustand eines zellulären Automaten darzustellen, indem man jede Zelle entsprechend ihrem Zustand schwarz oder weiß färbt oder andersfarbig bei mehr als zwei Zuständen. Das ergibt abhängig von den Regeln, denen der Automat gehorcht, charakteristische Bilder mit geordneter oder auch chaotischer Struktur.

Kommen zelluläre Automaten in der Natur vor? Manche Verfechter des Konzepts würden diese Frage mit einem klaren Ja beantworten. Mehr noch: Die ganze Welt sei ein zellulärer Automat. John von Neumann (1903–1957) zeigte schon in den 1940er Jahren, dass zelluläre Automaten erstaunlich vielfältige Verhaltensweisen aufweisen; John Horton Conway erfand einen berühmt gewordenen Automaten namens »Game of Life«; Konrad Zuse (1910–1995) arbeitete das Konzept in seinem Artikel »Rechnender Raum« aus (*Spektrum* Spezial 3/2007 »Ist das Universum ein Computer?«, S. 6), und Stephen Wolfram erhob 2002 in seinem Buch »A New Kind of Science« den – heftig umstrittenen – Anspruch, alle Wissenschaft auf zelluläre Automaten zurückführen zu können.

Allerdings denkt man sich die Zellen in diesen Konzepten sehr klein – kleiner als jede physikalisch messbare Länge, so dass die diskrete (aus getrennten Elementen bestehende) Struktur der Welt dem Beobachter verborgen bleibt und dieser sie als kontinuierlich wahrnimmt. Daher ist es eine echte Überraschung, dass ein zellulärer Automat mit Zellen in beobachtbarer Größe in der Natur vorkommt.

Es handelt sich um die Schuppen der Perleidechse (*Timon lepidus*, Bild rechts), die vor allem in trockenen Gebieten Spaniens heimisch ist. In der Tat ähnelt deren Muster den typischen Bildern zellulärer Automaten, wenn auch schwarz-grün statt schwarz-weiß. Aber zeigen diese Hautstückchen das Verhalten eines elementaren Automaten? Ändern sie insbesondere ihre Farbe in Abhängigkeit von der ihrer Nachbarn?

Um dieser Frage nachzugehen, setzte Michel G. Milinkovitch vom Fachbereich Genetik und Evolution der Universität Genf ein mehrjähriges Forschungsprojekt auf. Die Doktorandinnen Liana Manukyan und Sophie Montandon beobachteten mehrere Eidechsen jeweils drei Jahre lang, vom Schlüpfen aus dem Ei bis ins Erwachsenenalter, und

dokumentierten das Muster ihrer Schuppen. Der einigermaßen einheitlich braune, mit weißen, dunkelbraun umrandeten Flecken gesprenkelte Rücken des Jungtiers wandelt sich im Verlauf des Wachstums allmählich zum charakteristischen schwarz-grünen Muster des Erwachsenen.

Indem Manukyan und Montandon die Tiere in Abständen von wenigen Monaten fotografierten und die Bilder am Computer analysierten, konnten sie das Schicksal jeder einzelnen Schuppe nachvollziehen, während das Reptil auf die vierfache Länge heranwuchs (Bild rechts, links unten; beim erwachsenen Tier ist das jugendliche im gleichen Maßstab abgebildet). Mit nur geringfügiger Bildverzerrung gelang es ihnen, alle Schuppen an die geometrisch exakten Positionen eines Bienenwabenmusters zu setzen.

Beim erwachsenen Tier ist jede Schuppe auf dem Rücken entweder einheitlich schwarz oder einheitlich grün. (An den Flanken finden sich leuchtend blaue Flecken, die in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt wurden.) Solche scharfen Grenzen zwischen deutlich verschiedenen Farben sind im Tierreich häufig zu finden; bekannte Beispiele sind die Streifen des Zebras und die Flecken des Leoparden.

Die Muster entstehen durch eine Kombination von chemischen Reaktionen und Diffusion

Ein derart diskretes Erscheinungsbild kann durch einen kontinuierlichen Prozess zu Stande kommen, nämlich durch chemische Reaktion und unterschiedlich rasche Diffusion zweier Substanzen. Im Prinzip könnte ein Stoff, der für die Pigmentierung verantwortlich ist, in jeder Konzentration vorhanden sein; einem stabilen chemischen Gleichgewicht entsprechen aber nur ein sehr hoher und ein sehr niedriger Wert. Die zugehörige Theorie haben insbesondere Hans Meinhardt (1938–2016) und Alfred Gierer vom Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen ausgearbeitet (*Spektrum* März 2010, S. 52).

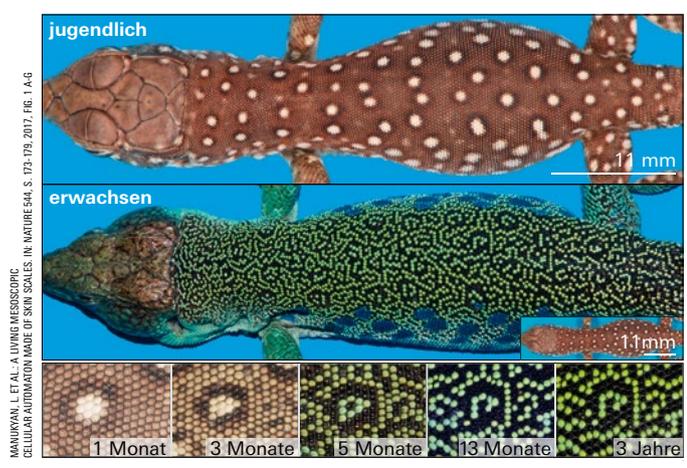
Aus derselben Theorie ergibt sich auch eine typische Größe für einen Pigmentfleck. Dass in diesem Fall die Färbung genau an der Schuppengrenze Halt macht, erklärt sich zwanglos dadurch, dass die Haut des Reptils zwischen den Schuppen erheblich dünner und die Diffusionskonstanten daher dort geringer sind als innerhalb der Schuppen. Nur im Bereich der Schwanzwurzel sind die Schuppen länglicher und erlauben deshalb auch einen internen Farbwechsel. Der Fields-Medaillen-Preisträger Stanislav Smirnov hat ein mathematisches Modell aufgestellt, das die Verbindung zwischen den Reaktions-Diffusions-Gleichungen einerseits und einem zellulären Automaten andererseits herstellt, und die dritte Doktorandin im Bunde, Anamarija Fofonjka, hat es durchgerechnet.

Der eingeschränkten Diffusion zum Trotz üben die Schuppen auf ihre Nachbarn einen gewissen Einfluss aus. Anders wären die charakteristischen Muster nicht zu erklären. Anscheinend neigen grüne Schuppen dazu, sich nicht zufällig zu verteilen, sondern in Reihen anzuordnen (Bild rechts, rechts unten). Es sieht so aus, als ob die grünen Schuppen es bevorzugen würden, wenn unter ihren sechs Nachbarn vier schwarze wären, während die schwarzen

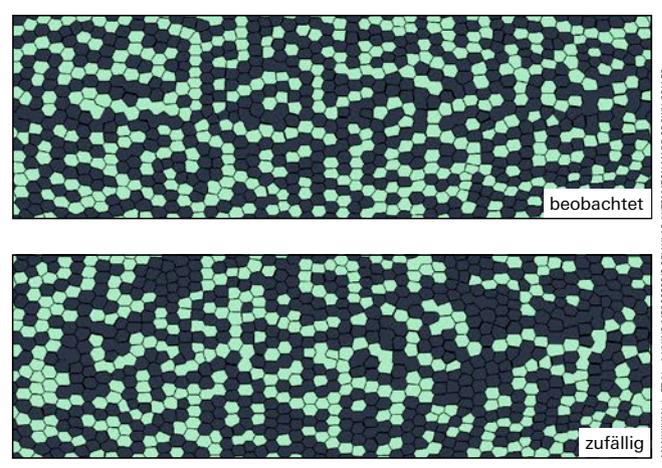


Liana Manukyan und Sophie Montandon beobachteten die Entwicklung des Schuppenmusters bei einer männlichen Perleidechse. Das echte Muster (rechts unten, oberes Teilbild) unterscheidet sich merklich von einer Zufallsverteilung schwarzer und grüner Schuppen mit demselben Verhältnis (unteres Teilbild).

BERNARD DUPONT, JEWELLED LIZARD (TIMON LEPIDUS) FEMALE (FOUND BY JEAN NICOLAS) (WWW.FLICR.COM/PHOTOSBERNIEDUP/23390784831/) CC BY-SA 2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/W/S/WZ.0/LEGAL.CODE)



MANUKYAN, L. ET AL.: A LIVING MESOSCOPIC CELLULAR AUTOMATON MADE OF SKIN SCALES. IN: NATURE 544, S. 173-179, 2017, FIG. 1 A-C



MANUKYAN, L. ET AL.: A LIVING MESOSCOPIC CELLULAR AUTOMATON MADE OF SKIN SCALES. IN: NATURE 544, S. 173-179, 2017, FIG. 3 A-C

sich mit drei schwarzen und drei grünen Nachbarn am wohlsten fühlen. Jedenfalls stellen diese Anzahlen sich beim Auszählen als die häufigsten heraus.

Damit erfüllt das System aus den Schuppen der Perleidechse zwei Diskretheitsbedingungen für zelluläre Automaten:

- ▶ bezüglich des Orts, indem es aus voneinander abgesetzten »Zellen« besteht, die sogar deutlich größer sind als Körperzellen; zu erklären durch die vorab ausgebildete Schuppenstruktur,
- ▶ und bezüglich des Zustands, der nur die beiden Werte Schwarz und Grün annehmen kann, zu erklären durch das Reaktions-Diffusions-Modell von Gierer und Meinhardt.

Bleibt noch die Diskretheit bezüglich der Zeit, dass also Zustandsänderungen stets in einem einheitlichen Zeittakt stattfinden. Dieses Merkmal hat das biologische System nicht zu bieten. Vielmehr ist es ein »stochastischer zellulärer Automat«, das heißt, in jeder Zelle löst der Zustand der

Nachbarschaft nicht eine Zustandsänderung zu einem bestimmten Zeitpunkt aus, sondern bestimmt nur die Wahrscheinlichkeit einer solchen Änderung, die dann – möglicherweise – zu einem zufälligen Zeitpunkt stattfindet.

In der Tat wechseln bei den echten Eidechsen, auch den ausgewachsenen, die Schuppen gelegentlich scheinbar spontan die Farbe, in jungen Jahren häufig und dann immer seltener. Mit dem Alter werden die Tiere also konservativer, was ihre äußere Erscheinung anbelangt, oder – was vielleicht auf dasselbe hinausläuft – die Schuppen sind einem Gleichgewichtszustand schon so nahegekommen, dass sie nur noch wenig Anlass sehen, sich zu ändern. ◀

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

QUELLE

Manukyan, L. et al.: A Living Mesoscopic Cellular Automaton Made of Skin Scales. In: Nature 544, S. 173–179, 13. April 2017

NEUROBIOLOGIE SICHERHEITSSCHALTER IN NERVENZELLEN

Das Protein Myt1l schaltet zahlreiche unerwünschte genetische Programme in Nervenzellen aus und bewahrt diese damit vor »Identitätskrisen«.

»Quo vadis?« (Wohin gehst du?) ist eine Frage, die sich nicht nur Philosophen stellen, sondern die auch für Körperzellen wichtig ist. Während der frühen Embryogenese stehen ihnen noch viele Wege offen, und sie müssen sich sozusagen entscheiden, welcher Zelltyp sie werden und welche Aufgaben sie im Körper übernehmen sollen. Aus den ersten Alleskönnern, pluripotente Stammzellen genannt, entstehen während der Embryonalentwicklung zahlreiche spezialisierte Varianten, etwa Haut-, Herz- oder Nervenzellen.

Doch was befindet darüber, welchen Weg eine Zelle einschlägt? Mit wenigen Ausnahmen enthält jede von ihnen sämtliche Erbanlagen, um jeden einzelnen der vielen hundert Zelltypen des Körpers entstehen zu lassen. Es muss daher einen Mechanismus geben, der sicherstellt, dass manche Gene im Zuge der Spezialisierung an-, andere hingegen abgeschaltet werden. Eine Nervenzelle beispielsweise muss chromosomale Abschnitte, die an der elektrischen Signalweiterleitung mitwirken, aktivieren – solche jedoch, die in Herz- oder Hautzellen aktiv sind, stummschalten.

Entwicklungsbiologen haben gezeigt, dass spezialisierte Proteine, so genannte Transkriptionsfaktoren, zelltypspezifische genetische Programme anschalten können, indem sie an die jeweiligen Gene binden und deren Ablesen (Transkription) aktivieren. So wirft der nervenzellspezifische Transkriptionsfaktor *Ascl1* gezielt solche Erbanlagen an, welche für die Differenzierung bestimmter Vorläuferzellen zu Nervenzellen sorgen.

Ein paar Proteine ändern das Schicksal von Zellen grundlegend

Es gibt aber auch das Gegenteil davon, nämlich Transkriptionsfaktoren, die Gene in erster Linie ausschalten. Diese bezeichnet man als Repressoren. Für die korrekte Entwicklung der Zelle werden beide benötigt. Ihr präzises zeitliches Zusammenwirken stellt sicher, dass sich unsere Zellen zum richtigen Zeitpunkt auf eine bestimmte Identität festlegen.

Lange Zeit dachten Forscher, dass Zellen, die sich einmal für eine bestimmte Identität entschieden haben, diese unwiderruflich annehmen und damit ihre ursprüngliche Pluripotenz verlieren. Bahnbrechende Arbeiten haben aber belegt, dass selbst differenzierte Zellen wieder zu Stammzellen werden können. Dies wird allgemein als Reprogrammierung bezeichnet und ermöglicht es, ganze Organismen mit all ihren verschiedenen Zelltypen aus einzelnen »zurückge-

setzten« Zellen herzustellen. 2006 demonstrierte ein Team um den japanischen Stammzellforscher Shin'ya Yamanaka (Universität Tokio), dass es ausreicht, lediglich vier Transkriptionsfaktoren in differenzierte Zellen einzubringen, um diese zu pluripotenten Stammzellen rückzuprogrammieren. Das war ein deutlicher Beleg dafür, dass Zellidentität nicht unwiderruflich fixiert ist.

Mit Hilfe von Transkriptionsfaktoren können Zellen sogar direkt ihre Identität wechseln, ohne den Umweg über den pluripotenten Grundzustand zu nehmen. So zeigten Forscher, dass bestimmte Transkriptionsfaktoren das Potenzial haben, Bindegewebs- direkt in Muskelzellen und B-Lymphozyten unmittelbar in Fresszellen (Makrophagen) umzuwandeln. Allerdings sind diese Zelltypen entwicklungsbiologisch einander ziemlich ähnlich. Ob sich auch sehr verschiedene Zelltypen ohne Umweg ineinander umwandeln lassen, war lange fraglich. 2010 lieferten Forscher um Marius Wernig von der Stanford University eine Antwort darauf. Indem sie die Transkriptionsfaktoren *Ascl1*, *Brn2* und *Myt1l* in Haut- oder Leberzellen einbrachten, wandelten sie diese innerhalb weniger Wochen in funktionstüchtige Nervenzellen um. Mittlerweile lassen

Mit Hilfe von Transkriptionsfaktoren können Zellen ihre Identität direkt wechseln

sich auch etliche weitere medizinisch relevante Zelltypen, etwa Insulin produzierende Pankreas-, Leber- oder Herzzellen, unmittelbar aus Bindegewebszellen erzeugen.

Die direkte Reprogrammierung von einem Zelltyp in einen anderen funktioniert jedoch nicht immer gleich gut. Selbst wenn man die richtigen Gene aktiviert, gibt es bei manchen Zelltypen große Probleme. Warum ist das so? Auf der Suche nach Antworten haben meine Kollegen und ich in Stanford eine unerwartete Entdeckung gemacht: Der Reprogrammierungsfaktor *Myt1l* fungiert in Zellen der Maus als molekularer Sicherheitsschalter, der unerwünschte Gene stummhält, so dass die Zellen nicht in einer Identitätskrise stecken bleiben.

In früheren Arbeiten hatten wir belegt, dass der Pionier-Transkriptionsfaktor *Ascl1* die treibende Kraft ist, die während der direkten Reprogrammierung von Bindegewebs- in Nervenzellen neuronal wichtige Erbanlagen aktiviert. Wie unsere neueren Untersuchungen belegen, spielt neben *Ascl1* aber auch *Myt1l* eine entscheidende Rolle in diesem Prozess. Der Reprogrammierungsfaktor bindet hauptsächlich an solche Gene, die gar nichts mit Nervenzellfunktionen zu tun haben. Verfolgt man ihre Aktivität während der Umwandlung zu Nervenzellen, stellt man fest, dass sie von *Myt1l* größtenteils abgeschaltet werden. Während *Ascl1* also ein nervenzellspezifisches genetisches Programm hochfährt, trägt *Myt1l* dazu bei, das Programm von Bindegewebszellen zu unterdrücken.

Weitere Untersuchungen weisen darauf hin, dass *Myt1l* nicht nur für Bindegewebszellen typische Erbanlagen stummschaltet, sondern auch solche für etliche weitere

Zelltypen wie Knorpel, Herz und Lunge. Myt1l kann man daher mit einer molekularen Sicherung vergleichen, die bewirkt, dass Zellen während der Reprogrammierung zu Neuronen nicht gleichzeitig versuchen, Bindegewebszellen zu bleiben oder zu einem anderen Zelltyp zu werden.

Doch ist dies auch in der normalen Entwicklung von Nervenzellen so? Um das zu untersuchen, haben wir zuerst die Wirkung von Myt1l auf natürliche Nervenvorläuferzellen von Mäusen analysiert. Bringt man einen Überschuss des Faktors in diese Zellen ein, entwickeln sie sich rascher zu Nervenzellen. Inaktiviert man ihn hingegen in Mäuseembryonen, reifen die betroffenen Hirnzellen nicht mehr vollständig in Neurone aus. Myt1l spielt demzufolge in der normalen Entwicklung von Nervenzellen eine wichtige Rolle.

Erstaunlicherweise bleibt Myt1l zudem in ausdifferenzierten Nervenzellen dauerhaft aktiv. Warum? Um dies zu untersuchen, haben wir den Transkriptionsfaktor in entsprechenden Zellen von Mäusen ausgeschaltet. Die Zellen verloren daraufhin nicht nur genetische und funktionelle Eigenschaften von Neuronen, sondern aktivierten auch Gene, die sonst nur in Herz- oder Hautzellen angeschaltet sind. Es scheint, als habe die Inaktivierung von Myt1l die Nervenzellen verwirrt, was ihre Identität angeht, woraufhin sie ihre Funktion und spezifische Merkmale verloren.

Schon länger ist bekannt, dass Mutationen in Myt1l mit neuropsychologischen Komplikationen wie Autismus und Schizophrenie in Verbindung stehen. Könnte es sein, dass diese Störungen von einer Identitätskrise der Nervenzellen herrühren? Unsere Forschungsergebnisse zeigen erstmals, wie wichtig das dauerhafte Unterdrücken unerwünschter genetischer Programme für die Entwicklung und Erhaltung der Nervenzellidentität ist. Myt1l schaltet offenbar etliche Programme aus, die Nervenzellen nicht betreffen, und ergänzt damit die Funktion aktivierender Transkriptionsfaktoren wie Ascl1. In dieser Teamarbeit liegt möglicherweise auch der Schlüssel für ein erfolgreiches Reprogrammieren hin zu Nervenzellen.

Unsere Arbeiten könnten damit neue Wege eröffnen, um Komplikationen wie Autismus oder Schizophrenie zu verstehen und zu behandeln. Möglicherweise werden Forscher zudem bald ähnliche inaktivierende Transkriptionsfaktoren auch für weitere Zelltypen finden. ◀

Moritz Mall arbeitet an der Stanford University in Kalifornien. Er erforscht Mechanismen der Differenzierung und Identität von Zellen anhand der direkten Umwandlung von Haut- zu Nervenzellen.

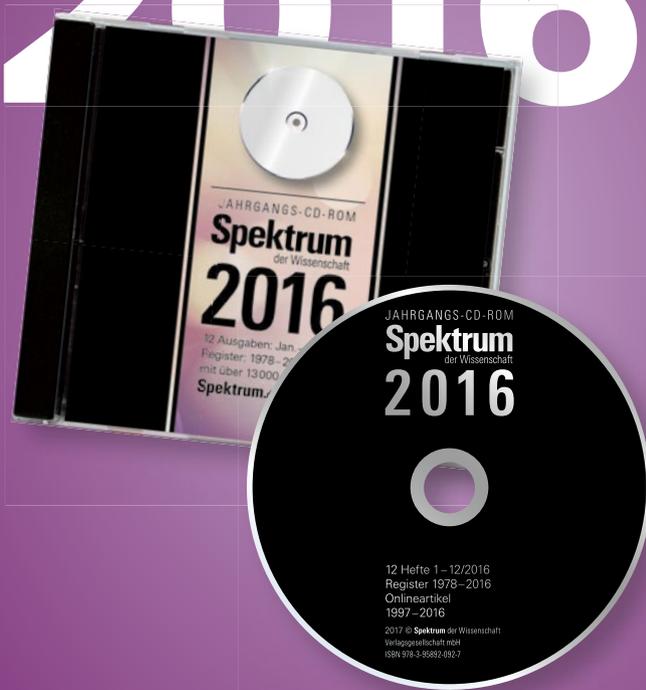
QUELLEN

Mall, M. et al.: Myt1l Safeguards Neuronal Identity by Actively Repressing Many Non-Neuronal Fates. In: Nature 544, S. 245–249, 2017

Mall, M., Wernig, M.: The Novel Tool of Cell Reprogramming for Applications in Molecular Medicine. In: Journal of Molecular Medicine 95, S. 695–703, 2017

Treutlein, B. et al.: Dissecting Direct Reprogramming from Fibroblast to Neuron Using Single-Cell RNA-Seq. In: Nature 534, S. 391–395, 2016

JAHR GANGS CD-ROM 2016



Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

Tel. 06221 9126-743

**www.spektrum.de/recherche
service@spektrum.de**

PHOTONIK EIN RING, SIE ZU BÜNDELN

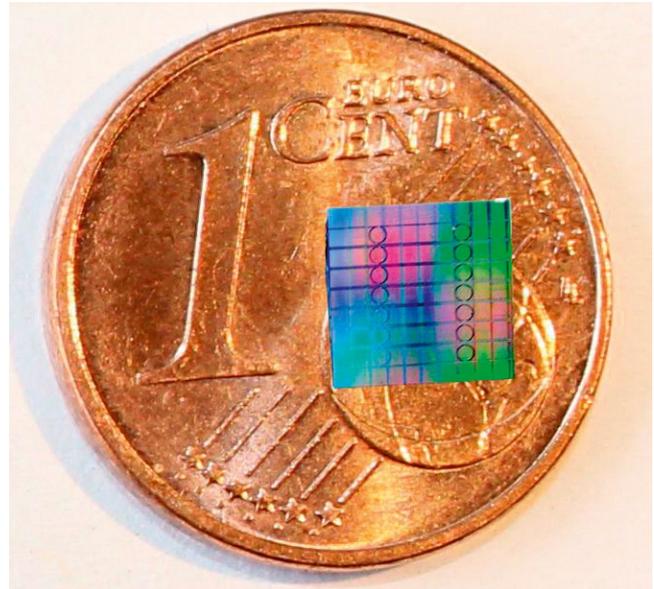
Der Datentransfer durch Glasfaserkabel erfordert normalerweise Hunderte von Laserdioden mit individuellen Spektralfarben. Ein neues Verfahren ersetzt diese Lichtquellen durch ein einziges optisches Bauteil.

► Glasfaserkabel bilden das Rückgrat des Internets. Für die höchsten Übertragungsraten setzen Kommunikationsdienstleister auf das so genannte optische Wellenlängen-Multiplexverfahren. Dabei bündelt der Sender verschiedene Wellenlängenbereiche in einem einzigen Lichtwellenleiter. Jede der Spektralfarben wird dabei von einem eigenen Laser erzeugt und bildet einen individuellen Kanal. Erst hunderte Lichtquellen, die jeweils in einem engen Frequenzbereich arbeiten, ermöglichen überhaupt die heute erreichbaren Bandbreiten.

Der Quantenelektroniker Pablo Marin-Palomo vom Karlsruher Institut für Technologie hat gemeinsam mit Kollegen von der École polytechnique fédérale de Lausanne all diese Laser durch so genannte Frequenzkämme aus optischen Mikroresonatoren ersetzt. Das könnte schnelle Übertragungsraten bei einer zugleich kompakten Bauweise gestatten.

Die Bauteile sind nur Bruchteile eines Millimeters groß (siehe Bild rechts oben). In den Mikroresonatoren entsteht Licht vieler verschiedener Frequenzen. Einer der Koautoren der Veröffentlichung, Tobias Kippenberg aus Lausanne, hat die Technologie vor rund einem Jahrzehnt mitentwickelt. Im Wesentlichen besteht sie aus einem »Pumplaser« als Lichtquelle sowie einem optischen Resonator, der Licht bestimmter Wellenlängen gewissermaßen einfängt (Illustration unten).

Das Material des Resonators reagiert nichtlinear auf den Laser. Das bedeutet, dessen Photonen können sich in Licht verschiedener Wellenlängen umwandeln, wenn sich unter den richtigen Umständen die optischen Frequenzen konstruktiv verstärken. Dann überlagern sich die Wellen-



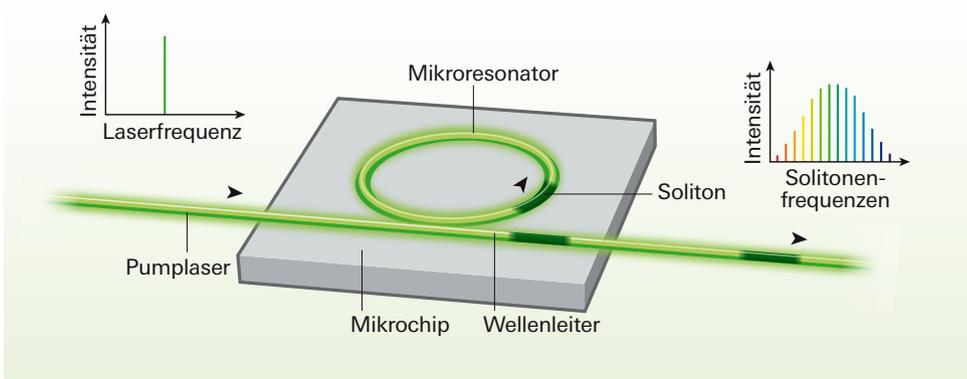
J. N. KEMAL / P. MARIN-PALOMO / KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

Mehrere ringförmige Mikroresonatoren passen auf einen wenige Millimeter großen Chip.

berge und -täler so, dass sich innerhalb des Resonators leistungsstarke schwingende Zustände aufbauen. Durch ein fein abgestimmtes Wechselspiel von Laser und Medium entstehen Wellenformen, die als Solitonen bezeichnet werden. Das sind stabile Wellenpakete, die ihre Form behalten und den Ring durchlaufen, ohne wieder zu zerfließen. Zwar sind Marin-Palomo und seine Kollegen nicht die Ersten, die solche Solitonen in optischen Resonatoren beobachten, aber sie haben sie erstmals zur Datenübertragung verwendet.

Die Forscher fertigten die ringförmigen Strukturen mit Hilfe hochpräziser lithografischer Techniken. Die Resonatoren haben einen Radius von 240 Mikrometern und bestehen aus Siliziumnitrid, einem in der Elektronikindustrie üblichen Werkstoff. Durch die spezielle Form konnten die Wissenschaftler mehr als 90 verschiedene Trägerwellen aus einem einzigen Strahl des Pumplasers gewinnen.

Viele aus einem



Ein Wellenleiter auf dem Chip führt das monochromatische Licht eines Pumplasers in eine kreisförmige Struktur. In dieser entstehen durch Resonanzeffekte stabile Wellenpakete. Solche Solitonen durchlaufen den Ring in vielen Frequenzen, deren Anzahl und jeweilige Wellenlänge von der genauen Geometrie des Bauteils abhängen.

TORRES-COMPANY, V.: ONE RING TO MULTIPLEX THEM ALL. IN: NATURE 546, S. 214-215, 2017, FIG. 1

Diese Frequenzen erstrecken sich über die gesamte Breite der so genannten C- und L-Bänder der optischen Datenkommunikation. Das entspricht einer Bandbreite von etwa zehn Terahertz. Den Abstand zwischen den einzelnen Frequenzen stellten die Forscher mit einer Genauigkeit von rund 200 Kilohertz ein. Damit eignet sich das so erzeugte Licht zukünftig womöglich auch für spektroskopische Untersuchungen an Molekülen.

Das Team um Marin-Palomo nutzte diese Frequenzkämme erfolgreich für eine Datenübermittlung mit mehr als 50 Terabit pro Sekunde. Zwar erreichten Wissenschaftler mit einer anderen Art Frequenzkamm bereits 2015 einen Rekord von 2150 Terabit pro Sekunde, allerdings war dafür unter anderem ein aufwändig und speziell für das Experiment gefertigtes Glasfaserkabel nötig. Der Reiz des Mikroresonators liegt in der äußerst kompakten Bauweise bei einer zugleich beachtlichen Übertragungsrate. Die zuletzt rasante Entwicklung bei photonischen integrierten Schaltungen dürfte in absehbarer Zeit optoelektronische Chips und vielfältige weitere Einsatzzwecke ermöglichen.

Wenn man viele verschiedene Trägerwellen aus einem Laser erzeugt, begrenzt das wiederum die Leistung, die für jeden einzelnen Kanal zur Verfügung steht. Dazu kommt ein generelles Problem von Solitonen in einem solchen Medium: Nur ein Bruchteil der Leistung des Pumplasers geht auf sie über. Im Fall dieses Experiments betragen die Verluste sogar mehr als 99 Prozent. Es gibt andere Verfahren, um Frequenzkämme mit besserer Ausbeute in Mikroresonatoren zu erzeugen; noch ist offen, ob sie sich ebenfalls für die Datenübertragung eignen. Dieses Effizienzproblem dürfte jedenfalls für alle zukünftigen Anwendungen entscheidend werden.

Marin-Palomo und seine Kollegen haben die grundsätzliche Tauglichkeit des Prinzips gezeigt. Im Gegensatz zu einer herkömmlichen Anordnung zahlreicher Einzellaser entsteht hier überdies eine Lichtquelle, bei der sowohl die Wellenlängen als auch deren Abstände zueinander exakt festgelegt sind. Damit könnten sich Übertragungsverluste verringern oder sogar die fundamentalen Sende- und Empfangstechniken drastisch vereinfachen lassen. Wenn alle Disziplinen zusammenarbeiten, von der Photonik bis zur Technischen Informatik, werden Frequenzkämme möglicherweise für einen grundlegenden Wandel beim Design von Kommunikationssystemen sorgen. ◀

Victor Torres-Company ist Assistenzprofessor in der Abteilung für Mikrotechnologie und Nanowissenschaften an der Technischen Hochschule Chalmers in Göteborg, Schweden.

QUELLE

Marin-Palomo, P. et al.: Mikroresonator-Based Solitons for Massively Parallel Coherent Optical Communications. In: Nature 546, S. 274–279, 2017

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 546, S. 214–215, 8. Juni 2017

ONKOLOGIE EPIGENETISCHE KREBSTHERAPIE

Krebs entsteht nicht nur durch Genmutationen, sondern auch durch veränderte epigenetische Modifikationen, welche die Genregulation durcheinanderbringen. Hier setzen Mediziner mit neuen Wirkstoffen an.

▶ Anfang der 1980er Jahre entdeckten die Genetiker Andrew Feinberg und Bert Vogelstein, seinerzeit an der Johns Hopkins University in Baltimore (USA), dass an der DNA von Krebszellen auffallend wenige Methylgruppen anhaften. Schon damals wusste man, dass Methylgruppen auf der DNA bestimmte Gene stummschalten können. Feinbergs und Vogelsteins Beobachtungen lieferten somit einen ersten Beleg dafür, dass Krebs nicht nur eine Krankheit der Gene ist, sondern auch eine des Epigenoms – jener Gesamtheit chemischer Veränderungen der DNA und ihrer Verpackungsproteine, welche die dreidimensionale Struktur der Chromosomen innerhalb des Zellkerns mitbestimmen. Eine neue Überblicksarbeit von Mark A. Dawson von der University of Melbourne (Australien) erhärtet dies nun und zeigt zugleich auf, wie komplex das Thema ist.

Zellen verändern ihr Epigenom, um schnell auf äußerliche und interne Stimuli zu reagieren. Anstatt die Nukleotidsequenzen der Gene selbst zu modifizieren – ein langsamer und unumkehrbarer Prozess –, hängen Enzyme kleine chemische Marker an die DNA, beispielsweise Methylgruppen. Auch die Verpackungsproteine der Erbsubstanz, die so genannten Histone, können chemisch mit Methyl-, Azetyl- oder Phosphatgruppen versehen werden. Das kann die Bindung zwischen DNA und Histonen verändern und somit Abschnitte der Chromosomen entweder verdichten oder auflockern. Dies wirkt sich stark auf die Genexpression aus, denn ob die Zelle bestimmte Erbfaktoren abliest oder nicht, hängt maßgeblich davon ab, ob diese ihrer Ablesemaschinerie überhaupt zugänglich sind.

Krebszellen missbrauchen solche Mechanismen, um sich unkontrolliert auszubreiten. Sie können zum Beispiel ihren Herkunftsort verlassen, durch den Organismus wandern, sich in fernen Organen ansiedeln und dort Tochter Tumoren (Metastasen) bilden, wenn sie vorübergehend in einen stammzellähnlichen Zustand übergehen, indem sie ihr Epigenom schnell und reversibel modifizieren. Die mangelnde DNA-Methylierung (»Hypomethylierung«), die Feinberg und Vogelstein seinerzeit in Krebszellen entdeckten, kann ferner die Entartung fördern, indem sie Chromosomenbrüche und die Neuordnung chromosomaler Abschnitte begünstigt. Denn bei Hypomethylierung fehlen sperrige Methylgruppen, die Chromosomen an kritischen Punkten stabilisieren.

Mittlerweile hat sich herausgestellt, dass es im Genom von Tumorzellen auch Abschnitte gibt, in denen sich Methylgruppen überdurchschnittlich häufen («Hypermethylierung»). Dies betrifft oft Regulationssequenzen unmittelbar vor so genannten Tumorsuppressorgenen. Deren Proteinprodukte verlangsamen das Tumorwachstum und den Entartungsprozess. Hypermethylierung der entsprechenden Sequenzen hemmt die zugehörigen Gene, so dass die Schutzproteine gar nicht erst entstehen. In den 1990er Jahren haben Forscher diesen Effekt bei zahlreichen Tumorsuppressoren nachgewiesen, etwa dem CDK-Inhibitor 2A und dem Retinoblastom-Protein – wichtigen Bremsen der Zellvermehrung.

Die ersten Moleküle, mit denen Forscher das Epigenom verändern konnten, waren Hemmstoffe von DNA-Methyltransferasen (DNA-MT), also von Enzymen, die Methylgruppen an die DNA hängen. Vor allem beim Behandeln des myelodysplastischen Syndroms (MDS), einer Vorstufe

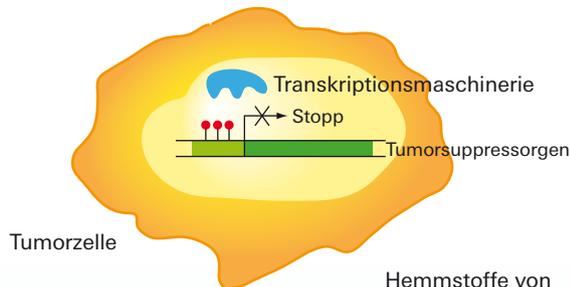
von Leukämie, haben sich DNA-MT-Hemmstoffe bewährt: Sie erwiesen sich als die ersten Medikamente, die das Leben von MDS-Patienten signifikant verlängerten. In den Jahren 2004 und 2006 ließ die amerikanische Arzneimittelbehörde FDA die beiden DNA-MT-Hemmstoffe Azacitidin und Decitabin zur Krebstherapie zu; in Europa kamen sie 2008 beziehungsweise 2012 auf den Markt. Die Stoffe reaktivieren offenbar Tumorsuppressorgene, deren Produkte dem Fortschreiten von MDS entgegenwirken (siehe »Tödliche Demethylierung«, unten).

Locker verpackte DNA unterstützt den Kampf gegen Krebs

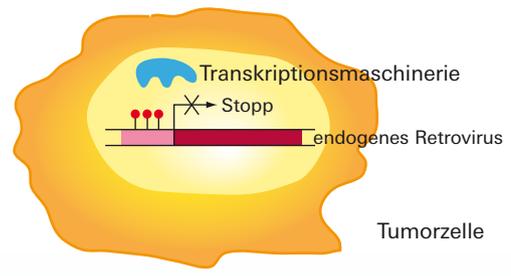
Zu den epigenetisch wirksamen Substanzen zählen auch Vorinostat und Romidepsin, mit denen sich Lymphome behandeln lassen. Sie hemmen allerdings nicht DNA-Methyltransferasen, sondern Histon-Deacetylasen (HDAC), also Enzyme, die Acetylgruppen von Histonen abspalten

Tödliche Demethylierung

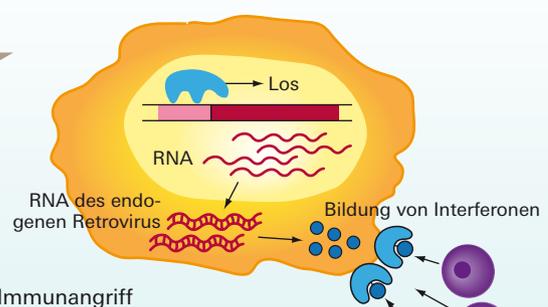
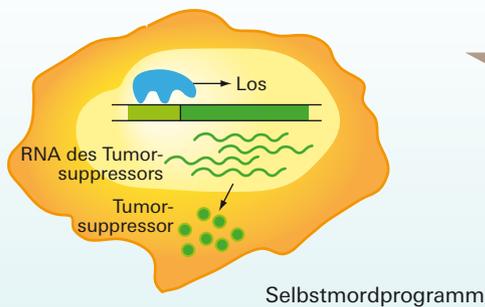
1 Reaktivieren von Tumorsuppressorgenen



2 Reaktivieren endogener Retroviren



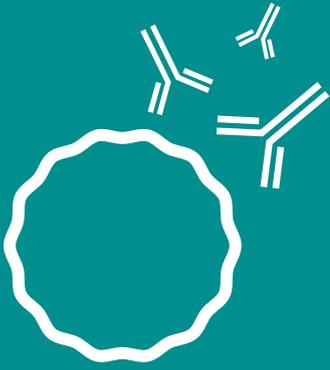
Hemmstoffe von DNA-Methyltransferasen



T-Lymphozyten der Immunabwehr

Zelltod

Hemmstoffe von DNA-Methyltransferasen wirken unter anderem, indem sie für das Verschwinden von Methylgruppen (rote »Lollis«) aus den Promotorregionen von Genen sorgen und die entsprechenden Gene damit aktivieren.



Unsere Vision: Nicht der Tumor wächst, sondern die Überlebenschancen.

Als eines der führenden Gesundheitsunternehmen gehen wir in der Krebstherapie auch einen neuen, personalisierten Weg – mit der Immunonkologie. Dabei stärken wir das Immunsystem in der Fähigkeit, Krebszellen zu entdecken und zu bekämpfen. Unser Ziel ist es, mit dieser innovativen Therapie möglichst viele Tumorarten zu behandeln und dem Leben so neue Perspektiven zu ermöglichen.

Weitere Informationen finden Sie auf: immunonkologie.de

© 2017 MSD SHARP & DOHME GMBH, Lindenplatz 1, 85540 Haar. www.msd.de



und dadurch das Chromosomenmaterial verdichten. Werden HDAC in ihrer Funktion beeinträchtigt, bleibt die DNA locker verpackt, was unter anderem die Expression von Tumorsuppressoren begünstigt. Ob dabei noch andere Mechanismen eine Rolle spielen, ist vorerst unklar – ebenso wie die Gründe, warum DNA-MT-Hemmstoffe vor allem beim myelodysplastischen Syndrom anschlagen, während HDAC-Hemmer bislang nur bei bestimmten Lymphomen wirken.

Sowohl DNA-MT- als auch HDAC-Hemmstoffe arbeiten sehr unspezifisch: Sie beeinträchtigen neben ihren eigentlichen Zielen zahlreiche weitere Moleküle, was mit schwer kontrollierbaren Nebenwirkungen einhergeht. Deswegen versuchen Forscher zunehmend, spezifischer wirkende Verbindungen zu entwickeln, die anderen epigenetischen Regulatoren entgegenwirken. Idealerweise sollten dabei nur Tumorzellen ins Visier geraten. Krebstypische Mutationsmuster, die inzwischen aus Tumor-Sequenzierungs-Projekten bekannt sind, lassen viele Defekte erkennen, die solche Regulatoren betreffen und somit das Epigenom beeinflussen. Dazu zählen Schäden an epigenetisch wirksamen Schreib- und Löschproteinen wie DNA-MT und HDAC, aber auch an so genannten Leseproteinen, die epigenetische Marker erkennen und interpretieren – etwa solche, die Azetylgruppen auf Histonen identifizieren.

Keine Begleiterscheinung der Tumorkrankheit, sondern ihre direkte Ursache

Forscher um Giulio Genovese vom MIT in Cambridge (USA) haben 2014 gezeigt: Die häufigsten Mutationen, die einer unkontrollierten Vermehrung von Blutzellen (als Vorstufe von Leukämie) vorausgehen, betreffen drei epigenetische Regulatoren – darunter eine DNA-MT. Ein falsch reguliertes Epigenom könnte also nicht nur eine Begleiterscheinung des Entartungsprozesses sein, wie lange vermutet, sondern seine direkte Ursache. Tatsächlich zeigen Untersuchungen, dass auffällige Methylierungs- und Azetylierungsmuster am Chromosomenmaterial schon sehr früh während der Tumorentstehung auftauchen, sogar vor dem Nachweis bestimmter Krebs fördernder Wachstumsfaktoren. Vermutlich bereiten sie den Boden für die Tumorerkrankung mit. Solche primären »Krebstreiber« zu erkennen und zu behandeln, ist in der Therapie von großer Bedeutung.

Epigenetische Effekte können auch indirekt vermittelt werden. So gehen bestimmte Formen der akuten myeloiden Leukämie (AML) auf Mutationen in den Stoffwechselfproteinen IDH1 und IDH2 zurück. Diese sind selbst keine epigenetischen Regulatoren, doch ihre mutierten Varianten hemmen in Blutzellen die DNA-Demethylasen, was zur Hypermethylierung führt. Wurden AML-Patienten, bei denen der Krebs nach vorheriger Therapie zurückgekehrt war, mit IDH2-Hemmern behandelt, bildete sich die Erkrankung in 40 Prozent der Fälle zurück oder verschwand sogar vollständig.

Dennoch sei es unwahrscheinlich, dass einzelne epigenetisch wirkende Arzneistoffe zu bahnbrechenden Therapieerfolgen führen, meint Mark Dawson. Bewähren

dürften sie sich eher als Ergänzung zur Chemotherapie, indem sie die Einlagerung von Zellgiften in die DNA begünstigen und so deren Wirkung auf Tumorzellen steigern.

Der meistversprechende Ansatz stammt derzeit aus dem Bereich der Krebsimmuntherapien: Forscher um Katherine B. Chiappinelli von der Johns Hopkins University haben 2016 von einer klinischen Studie berichtet, in der eine Vorbehandlung mit dem DNA-MT-Hemmstoff Azacitidin die Wirkung einer solchen Therapie verstärkte. Lungenkrebspatienten, bei denen die Krankheit trotz Standardbehandlung fortgeschritten war, hatten den Stoff erhalten und daraufhin eindrucksvoll auf so genannte Immuncheckpoint-Inhibitoren (siehe **Spektrum** November 2015, S. 15) reagiert. Bei einigen Patienten hielt der Effekt noch zweieinhalb Jahre nach Beginn der Therapie an.

Weckt man uralte virale Sequenzen auf, macht das Krebszellen gegenüber Immunangriffen empfindlich

Eine Erklärung für dieses Ergebnis lieferten zeitgleich zwei unabhängige Arbeitsgruppen. DNA-MT-Hemmstoffe führen demnach zu einer antiviralen Reaktion innerhalb der Tumorzelle, indem sie endogene Retroviren reaktivieren – Überbleibsel uralter Viren, die sich bei Infektionen vor vielen Generationen im Genom festgesetzt haben. Indem die Zelle deren Promotorsequenzen methyliert, hält sie die endogenen Retroviren inaktiv. DNA-MT-Hemmer heben diese Sperrung auf, was die Viren aufweckt und bestimmte Abwehrmechanismen innerhalb der Zelle ankurbelt. Das führt zu einer gesteigerten Empfindlichkeit gegenüber Immunzellen, die mit Immuncheckpoint-Inhibitoren aktiviert wurden (siehe »Tödliche Demethylierung«, S. 30).

Auch bei adoptiven Immuntherapien, bei denen Mediziner die Immunzellen eines Patienten im Labor vermehren, um sie ihm anschließend wieder zurück zu verabreichen, könnten epigenetisch wirkende Arzneistoffe nutzen. Denn HDAC- und andere Hemmstoffe versetzen T-Lymphozyten in einen verjüngten Zustand, was diese zu effizienteren Killerzellen macht.

All diese Befunde zeigen, welches klinische Potenzial darin steckt, das Epigenom zu manipulieren. Es winkt hier die Möglichkeit, den Entartungsprozess zu durchkreuzen, indem man ihn zumindest in Teilen rückgängig macht. Dazu müssen die Forscher künftig mit ausgeklügelteren Molekülen immer gezielter ins Epigenom eingreifen. ◀

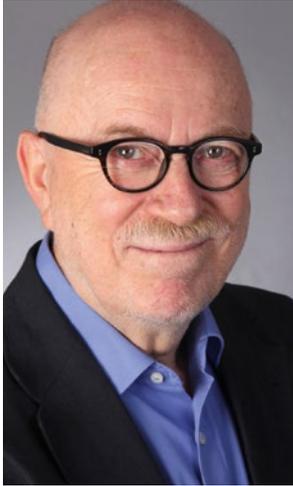
Emmanuelle Vaniet ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.

QUELLEN

Chiappinelli, K. B. et al.: Combining Epigenetic and Immunotherapy to Combat Cancer. In: *Cancer Research* 76, S. 1683–1689, 2016

Dawson, M. A.: The Cancer Epigenome: Concepts, Challenges, and Therapeutic Opportunities. In: *Science* 355, S. 1147–1152, 2017

Genovese, G. et al.: Clonal Hematopoiesis and Blood-Cancer Risk Inferred from Blood DNA Sequence. In: *The New England Journal of Medicine* 371, S. 2477–2487, 2014



SPRINGERS EINWÜRFE KORRUPTIONSBEKÄMPFUNG MIT HINDERNISSEN

Betrügerei ist eine soziale Pest, die ganze Volkswirtschaften ruinieren kann. Doch Gegenmaßnahmen gehen oft nach hinten los.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftsredakteur. Seit seiner Promotion in theoretischer Physik pendelt er zwischen den »zwei Kulturen«.

» spektrum.de/artikel/1478223

Öffentliche Hilfgelder bilden ein Maß für das soziale Gewissen einer Gesellschaft. Allerdings müssen sie die Richtigen erreichen; das Geld soll nicht in dunklen Kanälen verschwinden und am Ende bei Betrügern landen. Nur: Wie schafft man das? Es erweist sich als erstaunlich schwierig, die Wirkung von Hilfsmaßnahmen zu überprüfen – und erst recht, die überraschenden Nebenwirkungen der Kontrolle vorherzusehen.

Die paradoxen Folgen der Korruptionsbekämpfung untersuchte die Wirtschaftswissenschaftlerin Katherine Meckel von der University of Chicago am Beispiel eines Hilfsprogramms der US-Regierung für Schwangere und junge Mütter mit besonders niedrigem Einkommen. Diese erhielten Essenskarten für Milch und Eier. Probleme machten nicht die Mütter, sondern die Ladenbesitzer: Sie gaben die Nahrungsmittel heraus, sammelten die Kupons ein – und verrechneten dafür

Vetternwirtschaft lindert indirekt bisweilen die Not der Ärmsten

mit den Behörden deutlich höhere Preise, als sie von der normalen Laufkundschaft verlangten (http://people.tamu.edu/~kmeckel/kmeckel_jmp.pdf).

Schließlich fiel der Betrug auf, und die Transaktionen der Händler wurden von nun an elektronisch kontrolliert. Wie Meckel feststellte, war die Maßnahme nur auf den ersten Blick ein durchschlagender Erfolg: Die »doppelte Buchführung« hörte zwar sofort auf, aber dafür nahmen viele Ladenbesitzer Milch und Eier aus dem Sortiment, denn ohne die betrügerisch überhöhte staatliche Subvention war mit den armen Kunden der Umgebung kein lohnendes Geschäft mehr zu machen. Andere Händler boten zwar weiter die gute Nahrung an, erhöhten jedoch deren Preise – zum Schaden der Kundschaft ohne Essensmarken.

Meckel zieht dennoch eine schwach positive Bilanz; der Vorteil der erfolgreichen Betrugsbekämpfung werde von den negativen Folgen nicht ganz zunichtegemacht. Sie merkt aber an, dass die Nebenwirkungen vor allem die sozial Schwächsten getroffen haben.

Zu einem ganz ähnlichen Ergebnis kommt eine Studie der Ökonomin Oana Borcan von der University of East Anglia in Norwich (England). Sie untersuchte, wie sich in Rumänien die Einführung von Videoüberwachung auf die dort bei schriftlichen Abschlussarbeiten grassierende Korruption ausgewirkt hat (*American Economic Journal: Economic Policy* 9, S. 180–209, 2017).

Auch hier war die Maßnahme unmittelbar betrachtet ein Erfolg. Die Schummelei nahm schlagartig ab, was die auf einmal viel schlechteren Durchschnittsnoten offenbarten. Doch wiederum trübte sich das Bild bei genauerer Betrachtung. Die Leistungen fielen am stärksten bei den ärmeren Schülern, die zuvor von der kollektiv betriebenen Bestechung der Prüfer mitprofitiert hatten. Hingegen wussten sich die wohlhabenden Prüflinge anscheinend auch in der neuen Situation individuell ganz gut zu helfen. Im Resultat erlangten nach der Antikorruptionsmaßnahme prozentual weniger Schüler aus ärmeren Verhältnissen die Hochschulreife.

Falls es zutrifft, dass die indirekten Auswirkungen der Korruptionsbekämpfung oft die sozial Schwachen besonders treffen, dann liegt der paradox anmutende Umkehrschluss nahe: Die Korruption hat ihnen indirekt gewisse Vorteile gebracht. Die illegale Bereicherung von Beamten, Politikern oder Geschäftsleuten lindert über einen Trickle-down-Effekt bisweilen sogar die Not der Ärmsten ein wenig. Das gilt es zu bedenken, wenn man forsch gegen korrupte Entscheidungsträger vorgeht – sonst hören bloß die karitativen Wohltaten plötzlich auf, mit denen sie sich beliebt zu machen pflegten.

EVOLUTION

DIE WAHRE NATUR DER VIREN

NEUE SERIE: VIREN Lange haben Biologen die Viren vernachlässigt. Doch allmählich entdecken sie, wie ungeheuer vielfältig und zugleich allgegenwärtig diese sind. Und sie fragen sich, ob es sich bei Viren womöglich doch um lebendige Organismen handelt.



Patrick Forterre leitet das Laboratoire Biologie Moléculaire du Gène Chez les Extrémophiles (Labor für Genetische Molekularbiologie von Extremophilen) am Institut Pasteur in Paris.

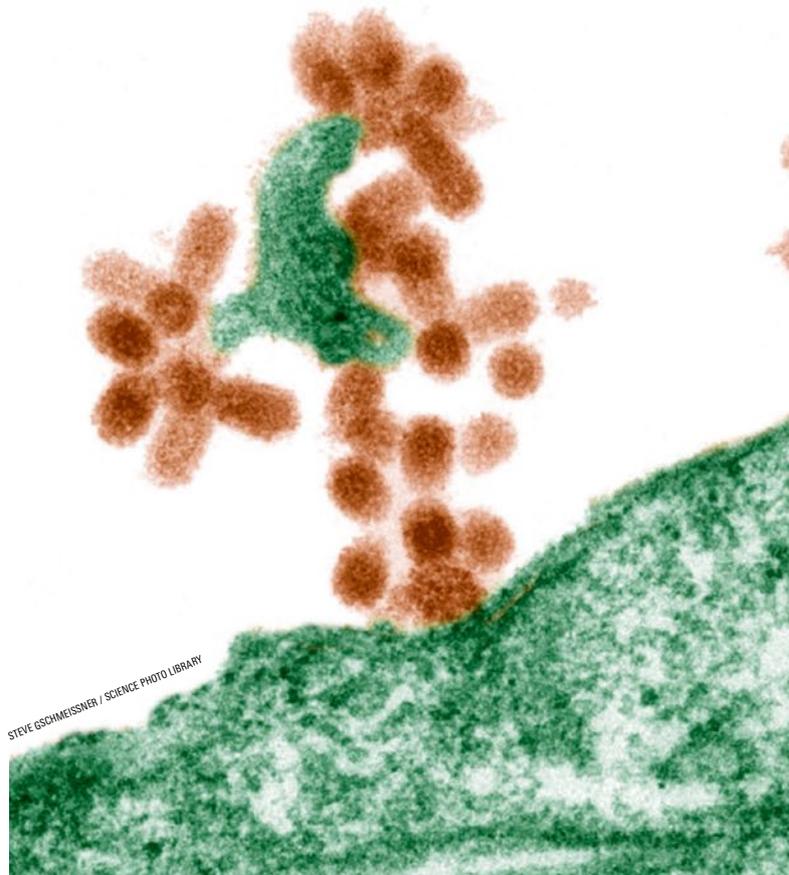
► spektrum.de/artikel/1478205

► Viren führten in der Biologie lange ein Schattendasein. Mediziner beschäftigten sich zwar mit ihrer Infektiosität, und die Molekularbiologen haben mit ihnen die großen molekularen Mechanismen des Lebens ergründet. Evolutionsforscher schenkten den Viren hingegen wenig Aufmerksamkeit. Allenfalls ließen sich an ihnen manche Evolutionsprozesse nachstellen, aber sie eigneten sich kaum dazu, den Stammbaum des Lebens zu rekonstruieren, so glaubten viele. Die meisten Biologen zuckten zusammen, wenn einem Virologen das Wort »Lebenszyklus« im Zusammenhang mit seinen Forschungsobjekten entschlüpfte. Für sie stand fest: Viren sind nicht lebendig!

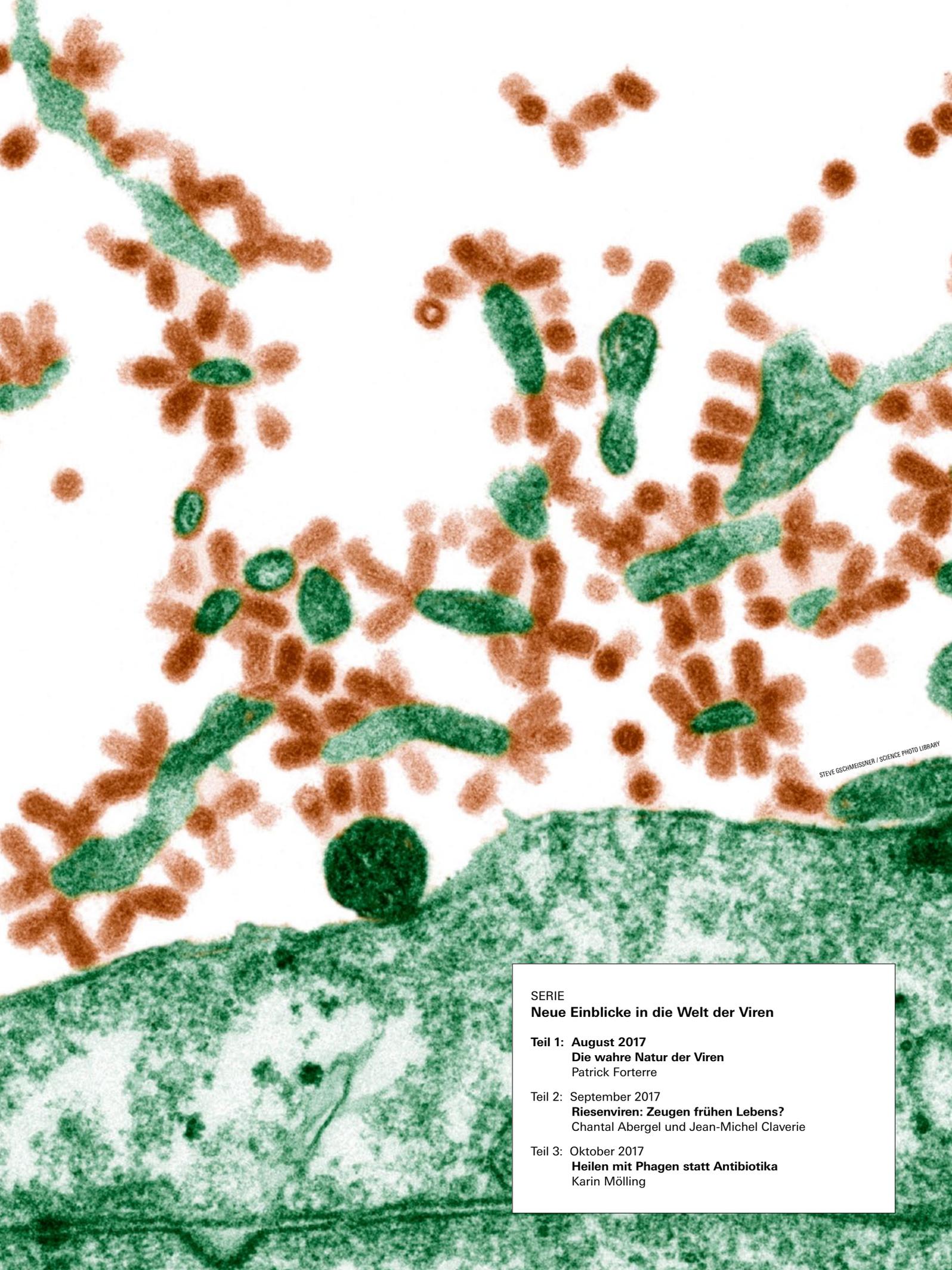
Doch so einfach verhält es sich keineswegs. Ob man die Viren zu den Lebewesen zählt oder nicht, wirkt sich auch auf die Forschungspraxis aus. Wer ihnen Lebendigkeit abspricht, klammert sie gewöhnlich von Szenarien zur Evolutionsgeschichte und dem Ursprung des Lebens aus. Daher kommen Viren in einer erheblichen Anzahl wissenschaftlicher Arbeiten zu solchen Themen überhaupt nicht vor. Umgekehrt neigen Virusforscher dazu, sie als lebendig einzustufen – besonders wenn sie ihre diversen Erscheinungsformen und ihre Bedeutung in Ökosystemen untersuchen.

Die Frage, ob die Viren leben oder nicht, stellt sich heute mehr denn je. Erheblich tragen hierzu das neue Forschungsfeld der viralen Ökologie und die Entdeckung von Riesenviren bei. Offenbar gibt es Viren in sehr viel größerer Zahl und Vielfalt als früher vermutet.

Die elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt Virionen des Grippevirus (rotbraun) beim Verlassen einer Tierzelle. Sie transportieren das genetische Material des Virus. Während ihrer Herstellung wird aus der infizierten Zelle eine »Viruszelle«: ein vom Virusgenom gesteuerter Hybrid.



STEVE GSCHMEISSNER / SCIENCE PHOTO LIBRARY



STEVE GSCHMEISSNER / SCIENCE PHOTO LIBRARY

SERIE
Neue Einblicke in die Welt der Viren

Teil 1: August 2017
Die wahre Natur der Viren
Patrick Forterre

Teil 2: September 2017
Riesenviren: Zeugen frühen Lebens?
Chantal Abergel und Jean-Michel Claverie

Teil 3: Oktober 2017
Heilen mit Phagen statt Antibiotika
Karin Mölling

AUF EINEN BLICK VIREN ALS EVOLUTIONSMOTOR

- 1 Noch bis vor Kurzem haben Biologen den Viren Lebendigkeit abgesprochen. Seit der Entdeckung der Riesenviren und der viralen Allgegenwart steht das Diktum jedoch zunehmend in Frage.
- 2 Die ersten Viren könnten vor den Bakterien, Archaeen und Eukaryoten aufgetreten sein, also älter sein als die drei heutigen Domänen des Lebens.
- 3 Ihre eigene Evolution geschah vermutlich mit Hilfe von ihnen infizierter Zellen. In diesem Zusammenhang könnten sie sogar die DNA »erfunden« haben.

Dabei schien der Sachverhalt Ende des 20. Jahrhunderts entschieden. Damals deklarierten das Internationale Komitee zur Taxonomie der Viren und sein damaliger Präsident Marc Van Regenmortel, Viren seien keine Lebewesen. Als Hauptargument wurde das Fehlen eines viralen Stoffwechsels angeführt. Es hieß, sie seien inerte Objekte, und sämtliche beobachtete Aktivität ginge auf die infizierten Zellen zurück. Viren würden auch nicht selbstständig evolvieren, sondern ihre Wirte würden das für sie bewerkstelligen.

Aus dieser zellzentristischen Sicht betrachtete man nur die Wechselbeziehungen der Viren mit zellulär organisierten Lebewesen. Dabei unterschieden die Forscher zwischen negativen, krank machenden Interaktionen und positiven Kontakten, bei denen das Virus etwa als Vehikel zum Gentransfer zwischen Zellen dient. Schon der französische Medizinnobelpreisträger von 1965 André Lwoff (1902–1994) hatte erklärt, nur zelluläre Organismen könnten lebendig sein. In seinem Gefolge hielten zahlreiche Forscher Viren für Komplexe aus Makromolekülen, also für Gebilde, die eher Zellorganellen ähnelten als irgendwelchen Lebewesen.

Doch Anfang des neuen Jahrtausends entfachte die Entdeckung von Riesenviren erneut eine heftige Diskussion über die Natur von Viren (siehe **Spektrum** Mai 2012, S. 14). War es wirklich vertretbar, ein Etwas als leblos einzustufen, dessen Genom die Information für deutlich mehr Proteine trägt als manche Bakterien? Virale Giganten können sogar selbst von kleineren Viren, so genannten Virophagen (»Virusfressern«), infiziert werden. Wie kann etwas erkranken, das gar nicht lebt?

Immerhin sind diese großen Gebilde wirkliche Viren, somit zwangsläufig Parasiten. Vermehren können sie sich nur mit Hilfe von Zellen, denn allein vermögen sie ihre eigenen Proteine nicht zu bilden. Deswegen rechnet ein Teil der Forscher sie bis heute nicht zu den Lebewesen. Für andere ist die Entdeckung allerdings revolutionär. Ihnen stellen sich neue Fragen wie: Wo liegt die Grenze, wenn kleine Viren keine Lebensformen darstellen, die

Riesenviren aber schon? Sie zwei verschiedenen Kategorien zuzuweisen, erscheint unsinnig, weil sie ein Kontinuum bilden von den kleinsten bekannten Viren mit lediglich zwei Genen bis zu den Pandoraviridae mit mehr als 2000.

Außer weiteren Meldungen zu Riesenviren gab es zwischen 1990 und 2010 allerdings noch andere sensationelle Entdeckungen, die ein völlig neues Licht auf die Welt der Viren werfen. So erkannten Molekularökologen, dass Viruspartikel, so genannte Virionen, in allen erdenklichen Umwelten vorkommen und allgegenwärtig sind. Man schätzt inzwischen, dass Virionen die Gesamtzahl der auf der Erde vorhandenen Zellen 10- bis 100-fach übertreffen. Sie finden sich massenhaft im Salz- und Süßwasser ebenso wie am Land und sowohl in extrem heißen wie extrem kalten Biotopen. Wir selbst und unser Inneres sind von ihnen übersät. Sie parasitieren unsere Zellen, etwa die Papillomviren unsere Schleimhäute, und verschiedenste Bakteriophagen befallen die Darmflora.

Die enorme Menge an Viruspartikeln überall in der Natur wurde offenkundig, als Mikrobiologen Anfang dieses Jahrhunderts damit anfangen, in großem Stil DNA aus Bodenproben zu sequenzieren. Denn das meiste derart erfasste Erbmaterial stammt von Viren. Von daher ist es wohl nicht übertrieben anzunehmen, dass das Gros der genetischen Information der Erde viraler Herkunft ist. Dass jedoch leblose Entitäten dergleichen hätten leisten können, also einen Großteil der für Leben so charakteristischen Erbinformation hervorbrachten, ist grundsätzlich nicht vorstellbar.

Die Entdeckung der Archaeen brachte die Einteilung des Lebens in zwei Bereiche ins Wanken

In den 1960er Jahren, als sich die Molekularbiologen daran machten, die Biologie zu revolutionieren, teilten sie die Lebewesen in zwei große Gruppen ein. Fortan galt: Es gibt die so genannten Eukaryoten (Eukaryonten), das sind alle zellulären Organismen mit echten, membranumschlossenen Zellkernen, darunter die Tiere, Pilze und Pflanzen; die anderen Formen ohne einen abgegrenzten Zellkern zählen zu den Prokaryoten (Prokaryonten), nach damaliger Kenntnis nur die Bakterien. Die strenge Zweiteilung traf auch die Viren. Man unterschied jetzt zwischen echten Viren, die Eukaryoten infizieren; und Bakteriophagen, die Bakterien befallen. Letztere heißen heute meist einfach nur Phagen. Diese Unterscheidung führte dazu, dass viele sich fragten: »Sind Phagen nun eigentlich Viren oder nicht?«

Die schlichte Einteilung des Lebens in zwei Bereiche geriet ins Wanken, als Carl Woese (1928–2012), Wolfram Zillig (1925–2005), David Prangishvili (* 1948) und ihre Kollegen in den 1980er Jahren eine dritte Domäne von Organismen entdeckten: die Archaeen, zunächst Archaeobakterien oder Urbakterien genannt. Auch diese besitzen eigene Viren, die teils sehr spezifisch aussehen. Manche davon produzieren zitronen- oder flaschenförmige Partikel, andere Fädchen, deren Enden an Krebszangen erinnern. Dergleichen hatte man noch nie gesehen.

Die meisten Biologen focht die Entdeckung zunächst allerdings wenig an. Sie stellten die Archaeen einfach zu den Prokaryoten, obwohl sie genau genommen mehr

Eukaryoten ähneln. Und deren Viren bezeichneten Virologen alter Schule als Bakteriophagen, sehr zum Leidwesen der Archäenexperten.

Die Zweiteilung in Viren und Phagen hielten jene Forscher für wissenschaftlich gut untermauert. Ihrer Ansicht nach waren die beiden Gruppen nicht miteinander verwandt, hatten nicht einmal einen gemeinsamen evolutionären Ursprung. Denn nach einer Theorie aus der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entstanden Phagen einst aus Genomfragmenten von Urzeitbakterien. Indem sie sich eine Proteinhülle zulegten, wurden daraus eigenständige Viruspartikel. Entsprechend sollten die Viren der Eukaryoten aus Chromosomenfragmenten ihrer Wirte hervorgegangen sein, quasi als Akt der Rebellion. Hiernach waren Viren nichts weiter als Nebenprodukte zellulärer Aktivität. Man glaubte auch, dass die so genannten Prophagen und Proviren in unserem Erbgut diese Entwicklungsgeschichte widerspiegeln. Es handelt sich dabei um im Genom von Bakterien und Eukaryoten integrierte genetische Fragmente, die sich unter Stressbedingungen in infektiöse Viren umwandeln können.

Doch 1999 wiesen zwei Forscherteams – um Dennis Bamford von der Universität Helsinki und Roger Burnett vom Wistar Institute in Philadelphia – in proteinkristallografischen Untersuchungen nach, dass Adenoviren in einigen Merkmalen völlig unerwarteterweise dem kleinen Bakteriophagen PRD1 ähneln. Erstere, die unter anderem Atemwegsinfektionen verursachen, sind ziemlich groß. Wie bei PRD1 besteht ihr Erbgut aus DNA. Das Kapsid (die

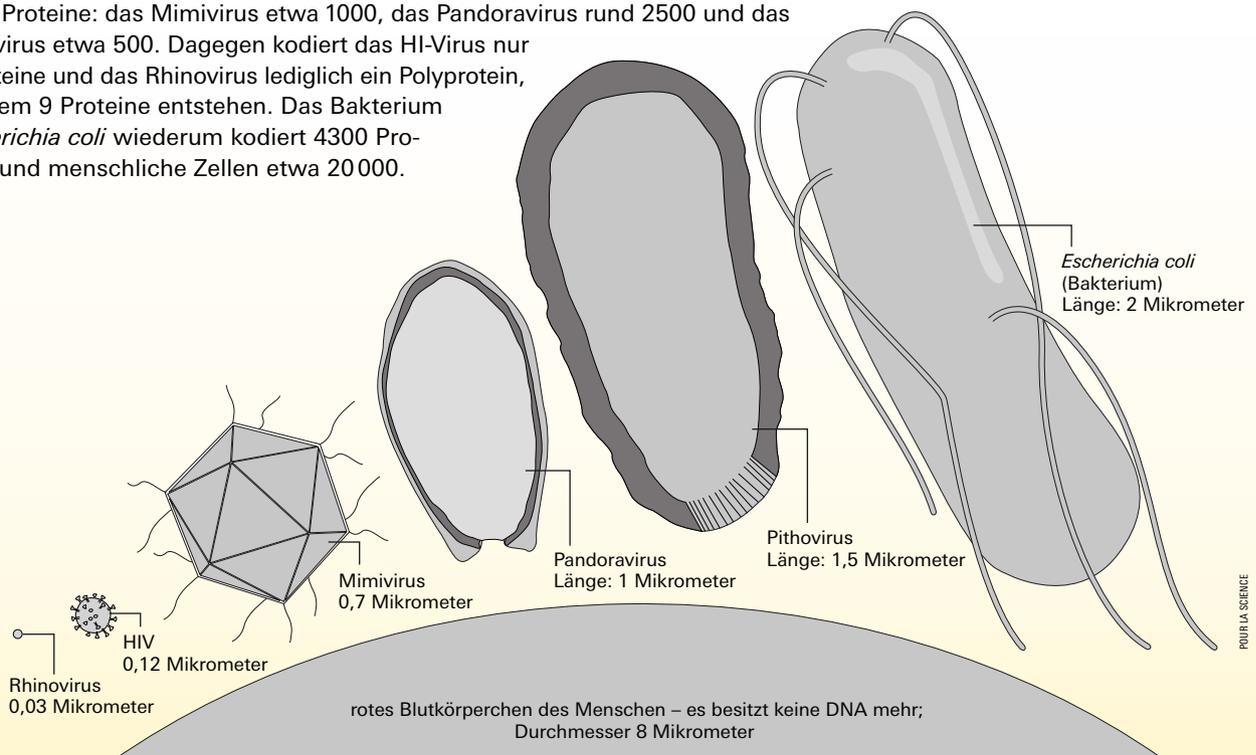
Kapsel) beider Viren ist aus homologen – abstammungsgleichen – Proteinen aufgebaut. Deren Peptidketten falten sich bei beiden zu einer komplexen räumlichen Struktur übereinander, die als DJR (double jelly roll, »doppelte Biskuitrolle«) bezeichnet wird. Eine voneinander unabhängige Entstehung wäre sehr unwahrscheinlich. Zudem benutzen beide Viren Pumpenproteine, um ihre DNA ins Innere der Virionen zu packen, und auch die sind homolog, haben also dieselbe Herkunft.

Unerwartete Ähnlichkeiten zwischen Adenoviren und einem Phagen: Hatten sie etwa sehr früh einen gemeinsamen Vorfahren?

Das muss bedeuten: Entweder war ein Virus vom DJR-Typ von Bakterien zu Eukaryoten übergewechselt oder umgekehrt; oder aber die beiden Viren haben einen gemeinsamen Virusvorfahren. Dieser müsste dann schon zu Zeiten von LUCA existiert haben, dem unbekanntem letzten gemeinsamen Vorfahren (last universal common ancestor) aller heutigen Organismen. Bisher kennen Forscher kein Beispiel dafür, dass ein Virus zu einer anderen Domäne des Lebens gewechselt wäre. Die Aminosäuresequenzen

Giganten unter den Viren

Die Riesenviren sind viel größer als die »klassischen« Viren und kodieren wesentlich mehr Proteine: das Mimivirus etwa 1000, das Pandoravirus rund 2500 und das Pithovirus etwa 500. Dagegen kodiert das HI-Virus nur 9 Proteine und das Rhinovirus lediglich ein Polyprotein, aus dem 9 Proteine entstehen. Das Bakterium *Escherichia coli* wiederum kodiert 4300 Proteine und menschliche Zellen etwa 20000.



der wichtigsten Kapsidproteine beider Virusgruppen ähneln sich nämlich gar nicht. Diese Moleküle gehen evolutionär somit schon sehr lange getrennte Wege. Sie behielten aber offenbar die ursprüngliche, gleiche räumliche Struktur bei und dazu ihre Fähigkeit, Ikosaederkapside zu bilden.

Kapside aus DJR-Proteinen entdeckten Forscher dann ebenfalls bei Viren von Archaeen, die in heißen Quellen des Yellowstone-Nationalparks beziehungsweise in Salzseen leben. Dieser Proteintyp bildet auch die Kapseln der meisten ikosaedrischen Riesenviren, die Eukaryoten infizieren, und sogar die von deren eigenen Virophagen. Solche Proteine und die zugehörigen Verpackungspumpen

Es dürfte mehrere Urviren gegeben haben, die LUCA vorausgingen, dem letzten gemeinsamen Vorfahren aller heutigen Zellen

kennzeichnen eine umfangreiche Gruppe von Viren aller drei Lebensdomänen, die demnach entfernt miteinander verwandt sein müssen.

Groß war die Überraschung, als sich Anfang dieses Jahrhunderts herausstellte, dass die Kapsidproteine von Bakteriophagen des Kopf-Schwanz-Typs mit denen von Herpesviren verwandt sind. Erstere (Hongkongtyp genannt) erinnern mit ihren »Beinchen« und dem großen ikosaedrischen »Kopf« an Mondlandefähren (siehe Bild S. 41). Die Kopfform ähnelt zwar der der Kapside von PRD1 und von Adenoviren, doch die beteiligten Proteine haben nichts miteinander zu tun. Vielmehr stellt der Hongkongtyp eine zweite universale Virusgruppe dar. Auch sie dürfte schon zu Zeiten von LUCA existiert haben.

Aus all dem folgt, dass die Viren polyphyletisch sein müssen, also nicht sämtlich derselben Wurzel entstammen. Es scheint verschiedene Urviren, mehrere virale LUCAs, gegeben zu haben, und die meisten von ihnen gingen dem zellulären LUCA sicherlich voraus. Das bedeutet allerdings keineswegs, dass Viren die ältesten Erscheinungsformen von Leben auf der Erde waren. Schließlich können sie ohne Wirtszellen und deren Ribosomen, an denen die Proteine entstehen, nicht existieren.

Entsprechend schlugen 2008 Didier Raoult – dessen Labor an der Aix-Marseille Universität unter anderem Riesenviren erforscht – und ich als Definition vor: Viren sind Kapside kodierende Organismen. Und da ein Kapsid aus mindestens einer Art von Protein besteht, konnten Viren, wie wir sie heute kennen, nicht vor den Proteinen bekannter Machart existiert haben, somit auch nicht vor den Ribosomen. Diese Proteinfabriken in den Zellen wiederum sind so hochkomplex aufgebaut, dass sie sicherlich erst nach einer längeren Evolution urzeitlicher Zellen auftraten.

Die Befunde meiner Kollegen zu den Viruskapseln begeistern mich schon deswegen, weil ich selbst aus ganz anderen Gründen seit Langem davon überzeugt bin, dass

Viren sehr alt sind. Anfang der 1980er Jahre forschte ich am Institut Jacques Monod in Paris über die Replikation, also Verdoppelung der DNA. Ich interessierte mich für DNA-Topoisomerasen, Enzyme, welche die DNA-Stränge räumlich verändern, somit zum Beispiel ver- oder entdrillen. Nun hatte 1979 an der University of California in San Francisco ein Forscherteam unter Leitung von Bruce Alberts gezeigt, dass der Bakteriophage T4 – ein Kopf-Schwanz-Phage, der *Escherichia coli*-Bakterien infiziert – eine völlig andere DNA-Topoisomerase kodiert als sein Wirt. Sein Enzym passt eher zu Eukaryoten als zu Bakterien. So postulierte ich 1991, Viren könnten einer frühen, inzwischen verschwundenen zellulären Domäne des Lebens entstammen. Die These fand damals kaum Beachtung. Das änderte sich erst mit der Entdeckung der Riesenviren.

Möglicherweise ist die DNA sogar viralen Ursprungs. Wie sich nämlich zeigt, kommen bei Viren recht oft Enzyme zum Manipulieren von DNA vor, darunter Polymerasen und Helikasen, deren genetische Codes sich von denen ihrer Wirte stark unterscheiden. Die gemeinsame Wurzel dieser Enzyme müsste demnach sehr weit zurückliegen, was meines Erachtens für eine frühe virale DNA-Welt sprechen könnte. Bereits in ihr hätten die Enzymlinien begonnen, sich auseinanderzuentwickeln. In Anlehnung an das »Out of Africa«-Szenario für den *Homo sapiens*, das sich in der großen genetischen Vielfalt der Afrikaner spiegelt, könnte man für die DNA eine »Out of viruses«-Hypothese vertreten.

DNA (Desoxyribonukleinsäure) ist bekanntlich eine modifizierte Form von RNA (Ribonukleinsäure). Angenommen, es gab zunächst eine urzeitliche virale RNA-Welt, und bei einigen jener RNA-Viren wären spontan entsprechende Modifikationen des Erbguts zu DNA aufgetreten: Das hätte ihnen sicherlich zum Vorteil gereicht, da die

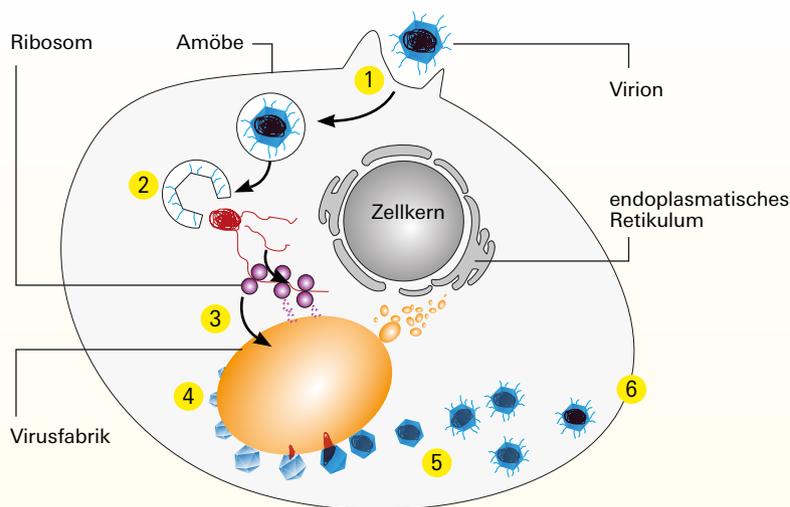
Große Gen-Erfinder

Die meisten neuen Gene entstehen aus zufällig auftretenden so genannten Protogenen, die kleine, nutzlose Peptide kodieren. Das zeigt die vergleichende Genomforschung. Sofern solch ein Molekül der Zelle allerdings irgendwann doch Vorteile bringt, kann daraus ein Gen für ein funktionales Protein werden. Der Vorgang wurde für Hefen und Tauflieden beschrieben, gilt vermutlich aber ähnlich auch für Bakterien, Archaeen und Viruszellen, somit Viren.

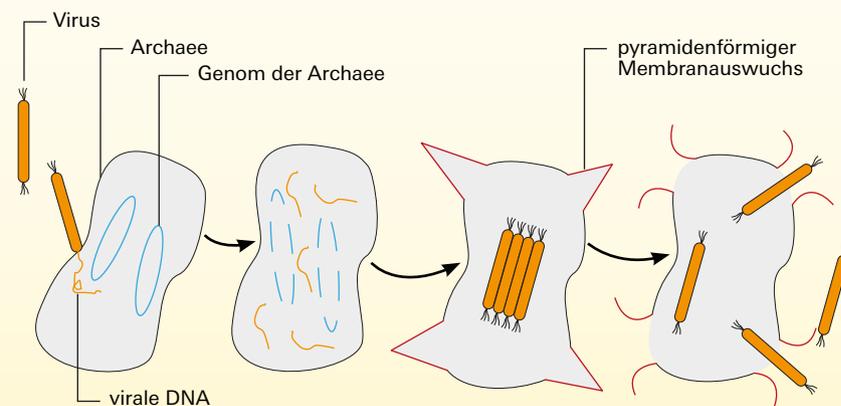
Im Viruszellstadium exprimieren und vervielfältigen Viren ihr Genom, wobei sich dieses teils verändert. Das könnte erklären, wieso die Überzahl ihrer Gene nicht mit den bekannten zellulären Genen – also welchen von Bakterien, Archaeen oder Eukaryoten – verwandt sind: Die Viren haben sie erst erfunden.

Die Viruszelle

Zur Produktion neuer Viruspartikel kapern alle Viren Zellen. In einer vom Mimivirus infizierten eukaryotischen Zelle (oben) entsteht dazu eine »Virusfabrik«: Das Virion umhüllt sich mit einem Stück Zellmembran (1) und dringt so in die Zelle ein; sein Kapsid und die Bläschenmembran verschmelzen, das Gebilde öffnet sich und entlässt das virale Genom ins Zellinnere (2), wo es erstmals transkribiert wird; jetzt bildet sich unter Verwendung von zellulärem Material eine Virusfabrik (3); diese produziert Kapside (4) und packt in jedes ein Virusgenom; die Virionen werden fertig gestellt (5), brechen die Zelle auf und kommen frei (6).



Bei prokaryotischen Zellen stellt die ganze Zelle eine Virusfabrik dar (unten). Im gezeigten Beispiel wird *Sulfolobus*, eine Archaeae, vom Virus SIRV2 infiziert: Letzteres entlässt sein Genom in die Zelle; das Genom des Archaeons wird zerstört und das des Virus vermehrt; nun entstehen neue Viren; an der Zellmembran bilden sich pyramidenförmige Auswüchse, die sich schließlich öffnen und die neuen Viren entlassen.



Abwehrenzime ihrer Wirte nur virale RNA-Genome zerstören konnten.

Ähnlich ist die DNA vieler heutiger Bakteriophagen in einer Weise abgewandelt, dass bestimmte Bakterienenzyme ihr nichts anhaben können. Zum Beispiel ist dann ein Baustein durch einen leicht andersartigen ausgetauscht. Vielleicht geschah bei einem frühen Virus tatsächlich eine Umwandlung von einem RNA- in ein DNA-Genom. Und danach hätten die DNA-Viren immer komplexere und vielfältigere Replikationsmechanismen ausgebildet – die zelluläre Organismen schließlich übernahmen.

Das könnte einen rätselhaften Widerspruch erklären. Die Ribosomen von allen drei Domänen des Lebens einerseits ebenso wie die RNA-Syntheseenzyme – andererseits die RNA-Polymerasen – ähneln sich untereinander so stark, dass man sie auf den letzten gemeinsamen Vorfahren LUCA zurückzuführen vermag. Hingegen sind die DNA-Replikationsmaschinerien der Bakterien einerseits und die von Archaeen und Eukaryoten andererseits nicht homolog, leiten sich also nicht von einem gemeinsamen Ursprung her. Das ließ einige Forscher spekulieren, LUCA könnte noch ein RNA-Genom gehabt haben. Doch nach der »Out of viruses«-Hypothese könnten zwei verschiede-

ne virale DNA-Replikationsmechanismen unabhängig voneinander auf Zellen transferiert worden sein. Den einen Mechanismus erwarb ein Bakterienvorfahr, den anderen ein gemeinsamer Vorfahr der Archaeen und Eukaryoten. In klassischer Manier evolutionären Wettrüstens hätten die Zellen Nutzen aus einer zuvor gegen sie gerichteten Erfindung ihrer viralen Gegner gezogen.

Die Aversion mancher Biologen gegen die neue Virus-hypothese beruht auf einer alten Begriffsverwirrung

Während einige meiner Fachkollegen diese Hypothese interessiert aufnahmen, wiesen andere sie heftig zurück. Ich bekam zu hören, Viren, diese passiven Entitäten und Nebenprodukte der zellulären Evolution, könnten nichts »erfunden« haben, also auch nicht DNA. Ich begriff, dass die Aggressivität, die ich erfuhr und mit der man den Viren jede Kreativität absprach, mit einer alten Begriffsverwirrung zusammenhing: Oft wird nicht sauber zwischen Virus und Virion unterschieden.

Das hängt mit der Entdeckungsgeschichte zusammen. Zuerst hatte man die infektiösen Agenzien identifiziert, die Virionen. Im Gegensatz zu Bakterien konnten irgendwelche winzigen, gefährlichen Partikel selbst feinste Porzellan-

filter passieren. Viele Menschen stellen sich unter Viren immer noch kleine, stachelige, unheimliche Kugeln oder Ähnliches vor. Eine 2006 publizierte Arbeit von Jean-Michel Claverie von der Aix-Marseille Universität half mir bei meinen Überlegungen weiter. Darin kritisierte er die Unschärfe der beiden Begriffe und schlug für das Mimivirus, ein Riesenvirus, vor, besser von einer Virusfabrik zu sprechen, die in infizierten Zellen entsteht und Virionen produziert (siehe »Die Viruszelle«, S. 39, oben).

Virus generell mit Virusfabrik gleichzusetzen, hielt ich allerdings für problematisch. In infizierten Bakterien und Archaeen bildet sich keine mikroskopisch erkennbare, abgegrenzte »Fabrik«. Vielmehr okkupieren die betreffenden Viren das gesamte Zellinnere, um ihre Virionen zu produzieren (siehe »Die Viruszelle«, unten). Die Lösung fand ich dann in einem Artikel von André Lwoff: 1953 schrieb er, ein Bakteriophage würde das infizierte Bakterium zu einer »Virusfabrik« machen, die Virionen herstellt. In diesem Bild ist die Fabrik also gewissermaßen das Virus. Für infizierte Zellen prägte ich nun das Wort »Viruszelle« (englisch »virocell«). Das bedeutet, die Zelle wird zu einem

anderen Organismus. Sie ist nun keine Archaea (oder Archaeon), kein Bakterium und kein Eukaryot mehr, sondern ein Virus in Form eines zellulären Organismus.

Wenn ein Virus für seine Vermehrung sorgt, ist das infizierte Bakterium oft längst tot

Das Konzept der Viruszelle widerspricht zentralen Argumenten, wonach die Viren keine Lebewesen sind und sich deshalb nicht selbst erzeugen und weiterentwickeln können. Aber nach der neuen Auffassung erbringen nicht die Zellen (ob Bakterien, Archaeen oder Eukaryoten) die Virusbildung. Bakterien sind zu dem Zeitpunkt oft sogar schon tot, speziell wenn ihr Genom zerstört wurde. Wie soll ein toter Organismus Viruspartikel produzieren? Nein – die Viren selbst sorgen dank der Viruszelle nach den darwinschen Gesetzen für ihre Bildung und Evolution.

Nach diesem Konzept hätten Viren einen Stoffwechsel. Sie kapern den biochemischen Apparat der infizierten Zelle und richten damit spezifische Verhältnisse ein, die allein der Virionenproduktion dienen (siehe »Die Viruszelle«). Manche Viren nutzen hierbei wirtseigene Enzyme,

Evolution des Zellkerns

Möglicherweise haben Viren hierbei mitgewirkt.

Die Virusfabriken, die DNA-Viren in Eukaryotenzellen etablieren, ähneln in mancher Hinsicht deren Zellkern. Gewissermaßen entwickelt sich in der infizierten Zelle vorübergehend ein Mikroorganismus, das eigentliche Virus. Dieses produziert mit den Ressourcen der Zelle Virionen (Viruspartikel), die in die Umwelt gelangen und neue Wirtszellen suchen.

Alle Viren benötigen zur Produktion ihrer Proteine zwar die zelluläre Translationsmaschinerie, sprich die Ribosomen; doch DNA-Viren von Eukaryoten sind von ihren Wirten in unterschiedlichem Maß abhängig. Manche benötigen nur Proteine für ihre Virusfabrik, andere sämtliche Funktionen des Zellkerns. Letztere müssen ihre DNA in den Kern einschleusen. Einige bauen sie dort sogar ein, so dass die Zelle sie mit dem eigenen Genom vervielfacht. Immer jedoch werden die Genabschriften, die RNA-Matrizen, außerhalb des Zellkerns in Proteine übersetzt. Virale Proteine besorgen

dann den Zusammenbau neuer Virionen.

Die unabhängigsten Viren, wie das Mimivirus, bringen die gesamte Maschinerie für diese Vorgänge quasi selbst mit. Andere, wie wahrscheinlich die Marseilleviridae, holen sich einige wenige zelluläre Proteine zur Unterstützung.

Eine Virusfabrik stellt ein veritables Zellkompartiment dar. Sie wirkt tatsächlich wie ein temporärer Mikroorganismus und enthält keine Organellen des Wirts, keine Mitochondrien und auch nicht dessen Ribosomen. Bei manchen Viren, etwa dem Erreger der Pocken, ist das Gebilde von einer Lipidmembran umgeben. Ebenso bilden die Mimiviridae und das Pithovirus eine Grenzschicht aus.

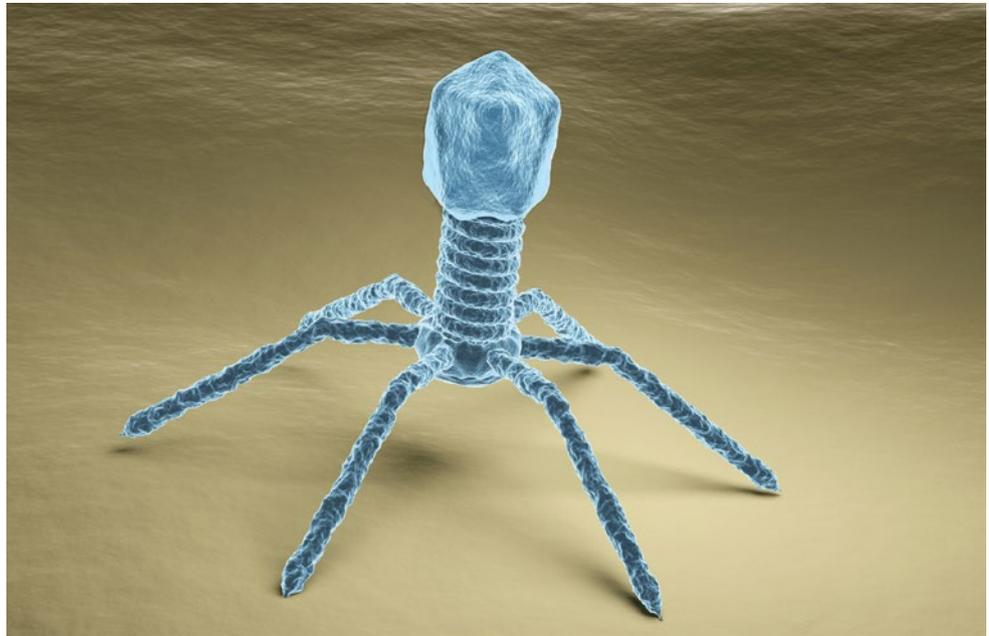
Der Virusfabrik und dem Zellkern ist vieles gemeinsam: Unter Ausschluss der Energie liefernden Organellen grenzen beide die Transkription und DNA-Replikation in ein bestimmtes Kompartiment ein. Beide erscheinen wie Parasiten

des Zytoplasmas, denn sie sind auf dessen Zutaten angewiesen. Des Weiteren laufen in beiden Strukturen sämtliche Phasen der DNA-Replikation ab. Und die jeweiligen Enzyme, die sich bei den Viren und Eukaryoten stark voneinander unterscheiden, erkennen dabei nur die regulatorischen Signale ihrer eigenen Herkunft. Wie die reifen viralen Boten-RNAs, die direkte Vorlage für die Proteinherstellung, aus der Virusfabrik ins Zytoplasma gelangen, bleibt noch zu klären. Fest steht, dass sie gegenüber zellulären RNAs bevorzugt werden, so dass nun vor allem Virusproteine entstehen.

All dem zufolge könnte der Zellkern der Eukaryoten durchaus von einem urzeitlichen Virus abstammen, das sich in frühen Zellen eingenistet hat – zum beiderseitigen Nutzen.

Chantal Abergel und **Jean-Michel Claverie** sind Mikrobiologen an der Aix-Marseille Universität und am CNRS (Centre national de la recherche scientifique).

Zunächst hielt man Erscheinungen wie diese für die eigentlichen Viren. Heute bezeichnet man die infektiösen Partikel, die für ihre Verbreitung sorgen, meist als Virionen. Denn bei »Viren« handelt es sich um einen biologischen Prozess in mehreren Phasen. Die Illustration zeigt einen typischen T-Phagen. Mit seinen Beinchen dockt er an ein Bakterium an und injiziert sein Erbmateriale, das der Kopf enthält, durch das Schwanzrohr in die Zelle.



EXTENDING / GETTY IMAGES / ISTOCK

aber viele kodieren diese selbst, zuweilen sogar eine große Anzahl davon. Ich neige sehr dazu, Viren als lebendig einzustufen. Mir ist jedoch bewusst, dass diese Haltung andere Fragen nach sich zieht wie: Sind dann vielleicht selbst Plasmide lebendig oder gar Gene?

Und was ist nun ein Virus? Das Virion gehört dazu, die Virusfabrik auch und ebenso ein in ein Zellgenom integriertes virales Genom. Doch darf man diese Erscheinungen mit dem Phänomen Virus gleichsetzen? Sogar Philosophen befassen sich mit dieser Frage, unter ihnen John Dupré von der University of Exeter und Thomas Pradeu von der Université de Bordeaux. Sie würden die Viren nicht als physisch distinkte Objekte begreifen, sondern als einen Vorgang, ein Entwicklungsgeschehen, das alle Phasen des viralen Zyklus umfasst. In diesem Sinn könnte man jeden Organismus als Prozess ansehen. Die Vorstellung passt zu der von Raoult und mir 2008 vorgeschlagenen Definition, wonach Viren Kapside kodierende Organismen sind. Heute würde ich lieber sagen: Es sind Organismen, die Virionen produzieren, die Markenzeichen ihrer Verbreitung.

Wenn man Viren so definiert, dann muss man bei der Frage nach ihrer Herkunft die Ursprünge der Proteinsynthese klären. Ich könnte mir vorstellen, dass lange vor LUCA, in einem RNA-Zellen-Zeitalter, unterschiedliche Virionentypen auftraten. Unter Umgehung der damals noch sehr plumpen Mechanismen der Zellteilung hätten Virionen es bestimmten Gengruppen ermöglicht, sich zu reproduzieren und zu vervielfältigen.

Vielleicht entstanden gleich nach den DJR-Viren (mit den »Biskuitrollen«-Proteinen) Riesenviren. Sie infizierten gemeinsame Vorfahren der Archaeen und Eukaryoten und wurden durch neue Gene, die sie selbst schufen, immer größer. Einige jener Gene mögen sie auf Eukaryotenvorfahren übertragen haben, womit sie an der Entstehung der modernen Eukaryotenzelle beteiligt gewesen wären, die auf diese Weise ihrerseits immer größer wurden. Insbe-

sondere der Zellkern der Eukaryoten und die Virusfabrik von Riesenviren erscheinen in mancher Hinsicht dermaßen ähnlich, dass Forscher einen Zusammenhang nicht ausschließen (siehe »Evolution des Zellkerns«, links).

Viren wären demzufolge prozessuale Entitäten, die sich stets weiterentwickeln. Das Leben an sich ist ein historischer Vorgang, der sich auf unserem Planeten seit mehr als dreieinhalb Milliarden Jahren vollzieht und permanent neue, eng miteinander verzahnte, verschachtelte Teilprozesse hervorbringt. Welche davon nun lebendig sind, ist oft nicht leicht zu entscheiden. Die Mitochondrien etwa, die »Kraftwerke« der Zellen, sind Zellorganellen, die von Bakterien abstammen, welche ihre Eigenständigkeit immer mehr eingebüßt haben. Viele Biologen dürften ein intrazelluläres Bakterium lebendig nennen, ein Mitochondrium nicht. Doch in welchem Augenblick der Evolution ging die Eigenschaft verloren? Ich persönlich finde, die Diskussion um die Lebendigkeit verschiedener biologischer Erscheinungen hat einen vitalistischen Beigeschmack, als wäre dies ein geheiligtes Attribut, das nicht leichtfertig verliehen werden darf. Wenn man den Begriff »lebendig« denn unbedingt verwenden möchte, sollte er ebenso für alle sekundären Prozesse gelten, die an dem evolutionären Vorgang teilhaben, den wir Leben nennen. ◀

QUELLEN

Forterre, P.: *Microbes from Hell*. The University of Chicago Press, 2016

Forterre, P.: *To Be or Not to Be Alive: How Recent Discoveries Challenge the Traditional Definitions of Viruses and Life*. In: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 59, S. 100–108, 2016

Forterre, P., Gaïa, M.: *Giant Viruses and the Origin of Modern Eukaryotes*. In: *Current Opinion in Microbiology* 31, S. 44–49, 2016

Zimmer, C.: *A Planet of Viruses*. The University of Chicago Press, 2. Auflage 2015

ICHTHYOSAURIER UNTERSCHÄTZTE URZEITJÄGER

Obwohl Ichthyosaurier 150 Millionen Jahre lang zu den wichtigsten Räubern der Meere gehörten, haben sich im vergangenen Jahrhundert nur wenige Paläontologen näher mit ihnen beschäftigt. Das hat sich jetzt geändert – und bereits zu faszinierenden Erkenntnissen geführt.

Traci Watson ist Wissenschaftsjournalistin in Washington, D. C. und schreibt vor allem über biologische Themen.

► spektrum.de/artikel/1478207

► Valentin Fischer wollte schon immer Fossilien erforschen, vielleicht von Dinosauriern oder ausgestorbenen Säugetieren. Während seines Geologiestudiums an der Universität de Liège sollte er dann allerdings erst einmal die Knochen prähistorischer Meeresreptilien sortieren, der Ichthyosaurier. Die Gruppe haben die Paläontologen lange Zeit wenig beachtet. Darum war es nicht gerade Fischers Traumjob. »Ich dachte: ach, diese langweiligen Ichthyosaurier«, erinnert er sich heute, »die sehen doch irgendwie alle gleich aus mit ihrer spitzen Schnauze und den großen Augen.«

Fischer ordnete pflichtbewusst die versteinerten Knochen, die in einer französischen Provinz entdeckt und in einer dortigen Forschungseinrichtung gelagert worden waren. Unter den in Plastikboxen gestopften Fossilien war auch ein durch Ameisenbauten und Baumwurzeln stark mitgenommener Ichthyosaurierschädel. Fischer reinigte ihn gründlich und erkannte dabei, dass es sich um eine bis dahin unbekannte Art handeln musste. Weitere seltsame Funde kamen hinzu – und damit hatte ihn das Thema richtig gepackt. Inzwischen hat er mit seinen Kolle-



gen sieben neue Ichthyosaurier beschrieben, von einem tunfischähnlichen Reptil mit dünnen, scharfen Zähnen bis zu einem orca-großen Exemplar mit einer spitzen Schnauze wie der eines Schwertfisches.

Die paläontologische Forschung erlebt derzeit eine wahre Renaissance der Ichthyosaurier. Nachdem die Tiere jahrzehntelang kaum beachtet wurden, beschäftigen sich immer mehr Wissenschaftler mit den Reptilien, die 150 Millionen Jahre lang zu den wichtigsten Räubern der

Meere gehörten (siehe Grafik S. 46/47). Das wieder aufgeflamnte Interesse brachte schon jede Menge Entdeckungen. Während zwischen dem 19. und dem 21. Jahrhundert etwa 80 Ichthyosaurierspezies und nahe Verwandte bekannt geworden waren, sind seit der Jahrtausendwende bereits weitere 20 bis 30 Arten dazugekommen, erzählt der Paläontologe Ryosuke Motani von der University of California in Davis. Die Zahl der Veröffentlichungen schießt in die Höhe. So berichtet Judy Massare vom College in

Viele Ichthyosaurier besaßen scharfe, konisch zulaufende Zähne, mit denen die Räuber auch große Beutetiere erlegen konnten.



Brockport an der State University of New York, die seit den 1980er Jahren an Ichthyosauriern forsch: »Zurzeit arbeiten mehr Leute auf dem Gebiet als in all den Jahren meiner Laufbahn zuvor.«

Mit den gesammelten Daten lassen sich nun langsam die wichtigsten Fragen zu den Reptilien beantworten, etwa wie sie sich entwickelten und zu den Herrschern der Ozeane wurden. Die Gruppe war vielfältiger als bis vor einiger Zeit gedacht, von frühen Kreaturen der küstennahen Gegenden, die sich wie Aale durch das Wasser schlängelten, bis hin zu riesigen Exemplaren, die zu Urzeiten die offenen Ozeane durchquerten. »Sie konnten sich überall hinbewegen, genau wie Wale«, erzählt Motani. Die gewaltigsten unter ihnen konkurrierten in der Länge mit den heutigen Blauwalen und waren die größten Räuber der Meere in der Trias.

Die Wissenschaftler beschäftigen sich außerdem vermehrt mit dem letzten Kapitel der Ichthyosaurier, das heißt ihrem Untergang in der Zeit der Oberkreide etwa 30 Millionen Jahre vor dem bekannten Massenaussterben der Dinosaurier. Nach Ansicht mancher Forscher verschwanden die Ichthyosaurier nicht zuletzt wegen drastischer Umweltveränderungen. Diese Theorie ist so etwas wie eine Wiedergutmachung für das bislang eher angekratzte Image der Tiergruppe – früher hieß es nämlich, sie sei von neu entwickelten, besseren und flinkeren Räufern wie den Haien verdrängt worden.

Es gibt einen weiteren Grund, wieso sich viele Paläontologen wieder für Ichthyosaurier interessieren. Deren entfernte Vorfahren waren nämlich Landreptilien. Somit bieten sie ein besonders dramatisches Beispiel für eine radikale Veränderung in der Evolution, erklärt der Paläontologe Stephen Brusatte von der University of Edinburgh im Vereinigten Königreich: »Die Tiere haben ihren Körper und ihr Verhalten für ein Leben im Wasser völlig umgestellt.«

Den Ausdruck Dinosaurier gab es noch nicht einmal, als im frühen 19. Jahrhundert die damals gerade einmal zwölf Jahre alte Mary Anning zusammen mit ihrem Bruder ein

seltsames Skelett an der Südwestküste Englands entdeckte. Der Fund brachte der angehenden und heute berühmten Fossilienjägerin immerhin 23 Pfund ein, eine beträchtliche Summe zu jener Zeit. Außerdem inspirierte er die erste wissenschaftliche Veröffentlichung über Ichthyosaurier, auch wenn der britische Anatom Everard Home in der Beschreibung 1814 fälschlicherweise von einem »Fisch, der nicht zur Familie der Haie oder Rochen zählt« sprach. Bald erkannten andere Naturforscher, dass dieses Fossil zu den Reptilien gehört.

Die Ichthyosaurier faszinierten die führenden Köpfe der Naturkunde. Der Franzose und Vater der Paläontologie der Wirbeltiere, Georges Cuvier, nannte sie »unglaublich« und begründete mit ihrer Hilfe seine Hypothese von Massenaussterbeereignissen auf der Erde durch wiederholt auftretende Katastrophen. Der britische Geologe Charles Lyell postulierte zwischenzeitlich sogar, Ichthyosaurier könnten wieder auf der Erde erscheinen, wenn die klimatischen Zyklen es zuließen.

Später wurden dann monströse Landtiere mit ihren oft imposanten Zähnen entdeckt: die Dinosaurier. Die neue Gruppe von Lebewesen begeisterte Öffentlichkeit und Wissenschaftler gleichermaßen, wodurch die Ichthyosaurier regelrecht »vom Thron gestoßen wurden«, erzählt Fischer. Die Fossilien der Meeresreptilien stapelten sich fortan weitgehend unbeachtet in den Lagern der Museen, und ihre Lebensgeschichte blieb ebenso im Dunklen.

Am Anfang der Erfolgsgeschichte stand ein Massenaussterben

Dank des inzwischen wieder erwachten Interesses an Ichthyosauriern füllen sich die Wissenslücken langsam, insbesondere die zum evolutionären Beginn der Tiere. So veränderte sich ihre Anatomie massiv – aus Landreptilien wurden reine Meeresbewohner. Dabei schrumpften ihre vorderen Extremitäten, und die Vorderfüße wurden größer und bildeten seetaugliche Flossen. Einige entwickelten die Fähigkeit, ihren Atem bis zu 20 Minuten lang anzuhalten. Bei vielen waren die Augen riesig, bei einer Art sogar größer als Fußbälle. Damit konnten die Tiere auch in den dunklen Tiefen des Meeres jagen. Wissenschaftler vermuten, dass diese Veränderungen kurz vor oder nach einem apokalyptischen Massenaussterben begonnen haben, bei dem am Ende des Erdzeitalters Perm 80 Prozent der Meereslebewesen untergingen. Noch bis vor wenigen Jahren gab es allerdings keine Fossilien, mit deren Hilfe sich der Übergang hätte nachweisen lassen.

Eines der ersten hilfreichen Fundstücke dabei war das Fossil einer Kreatur, die Motani als den bizarrsten frühen Ichthyosaurier bezeichnet. Er entdeckte ihn mit seinen Kollegen in einem Kalksteinbruch in China und beschrieb den Fund 2016. Der Schädel hatte etwa die Größe einer Orange, und der Rumpf war von einer beachtlichen Knochenplatte umgeben, weshalb ihn die Wissenschaftler *Sclerocormus parviceps* nannten, abgeleitet vom griechischen Begriff für »steifer Rücken« und dem lateinischen Ausdruck für »kleiner Schädel«. Das Tier hat vor 248 Millionen Jahren gelebt, nur vier Millionen Jahre nach dem Massensterben am Ende des Perms. In einem nahe gele-

AUF EINEN BLICK HERRSCHER DER OZEANE

- 1** Ichthyosaurier jagten von vor rund 250 bis vor etwa 94 Millionen Jahren in den erdmittelalterlichen Weltmeeren. Paläontologen haben die Tiere bisher weniger beachtet als die landlebenden Dinosaurier.
- 2** Jüngste Untersuchungen und neue Funde offenbaren eine erstaunliche Artenvielfalt. Im Lauf der Zeit entstanden zahlreiche Formen mit Lebensräumen von den Küstengewässern bis in die Tiefsee.
- 3** Forscher verbessern ihr Bild von der Evolution der Ichthyosaurier: wie sie sich aus Landräubern entwickelten, Massenaussterben überlebten und was schließlich doch zu ihrem Verschwinden führte.

genen weiteren Steinbruch fanden die Forscher noch einen stupsnasigen Ichthyosaurier etwa desselben Alters, *Cartorhynchus lenticarpus*. Dieser primitive Vertreter seiner Gattung von der Größe einer Regenbogenforelle schleppte sich möglicherweise mit Hilfe seiner starken Flossen an Land, so wie es heute noch Meeresschildkröten alljährlich zur Eiablage tun.

Solche frühen Exemplare waren zwar nicht die direkten Vorfahren der fischförmigen Ichthyosaurier, doch sie bringen die Forscher einen »großen Schritt voran in Richtung ihres Ursprungs«, meint die Paläontologin Erin Maxwell vom Staatlichen Museum für Naturkunde in Stuttgart. Die Fossilien zeigen beispielsweise, dass die Ichthyosaurier aus einem östlichen Teil des heutigen Südchina stammen. Zu jener Zeit war es eine der wenigen Regionen der Erde, wo erhebliche Mengen Landpflanzen gediehen. Die faulende Vegetation könnte die Gewässer mit Nährstoffen angereichert haben, überlegt Motani, woraufhin an der Küste lebende Tiere von der Nahrung ins Meer gelockt wurden.

Eines der Lebewesen, der erwähnte *Cartorhynchus*, hatte Schwimmflossen, die für das Leben an Land ganz gut geeignet waren, weshalb Motani auf terrestrische oder zumindest amphibische Vorfahren schloss. Damit wäre er ein naher Verwandter der ersten Ichthyosaurier. Anhand der schweren Knochen von *Sclerocormus* und *Cartorhynchus* schließt Motani auf ein Leben als Bodenbewohner, denn weitere Tiere durchliefen ebenfalls eine solche Phase, als sie sich von Land- zu Meereslebewesen entwickelten, erklärt er. Erst später eroberten die Ichthyosaurier den offenen Ozean. Auch andere Wissenschaftler halten die Fossilien aus China für wertvolle Fundstücke, an denen sich der Übergang zum Meereslebewesen nachvollziehen lässt. Sie sind »einige der interessantesten Reptilienfossilien, die in letzter Zeit überhaupt entdeckt wurden«, sagt Brusatte. »Sie geben uns einen Eindruck davon, wie aus einem an Land lebenden Reptil ein halb aquatisch lebendes und später ein fischähnliches Wesen werden konnte.«

Sobald der neue Lebensraum erschlossen war, entwickelte sich eine enorme Formenvielfalt

Der typische *Ichthyosaurus*, der sich mit einer langen Schnauze und einem abgeknickten Schwanz von seinen primitiven Vorfahren unterschied, trat erstmals in der frühen Trias auf und beherrschte schnell seine neue Umgebung. Anhand der Funde der letzten Jahre lässt sich zeigen, in welcher beeindruckenden Vielfalt die Fische parallel zum *Cartorhynchus* und direkt danach auftraten. Ein Beispiel dafür ist *Thalattoarchon saurophagis*, der »Echsen fressende Herrscher der Meere«: Eines der etwa schwertwalgroßen Exemplare war schon in den 1990er Jahren in Nevada entdeckt worden, musste dann aber bis 2008 auf seine vollständige Ausgrabung warten. Auf Grund der scharfen Zähne vermutet der Paläontologe Martin Sander von der Universität Bonn, der Mitglied des Natural History Museum of Los Angeles County ist und an der Veröffentlichung beteiligt war, einen »stattlichen Fleischfresser oder Fleischreißer«, der Fische und andere

Ichthyosaurier jagte. In der frühen Mitteltrias, etwa acht Millionen Jahre nach dem Massensterben am Ende des Perms, beherrschte die Kreatur die Meere und »fraß mehr oder weniger alles, was ihr unterkam«, so Sander.

Auf Spitzbergen, der norwegischen Inselgruppe nördlich des Polarkreises, fanden Forscher tief im Permafrost einen großen, primitiven *Ichthyosaurus*, der aus der sehr frühen Trias stammen soll. Die Funde müssen noch genau untersucht werden, aber sie könnten Hinweise darauf geben, wie »die Entwicklung richtig loslegte, sobald der Lebensraum Wasser erst einmal erschlossen

»Die Diversität des *Ichthyosaurus* in der Kreidezeit war wesentlich größer, als wir bisher dachten«

Darren Naish, University of Southampton

war«, meint der Paläontologe Patrick Druckenmiller von der University of Alaska in Fairbanks und Teil des Spitzbergen-Teams. Da die Forscher so riesige Räuber entdeckten, ist zu vermuten, dass nach dem Massenaussterben am Ende des Perms Lebewesen verschiedenster Größe und mit unterschiedlichsten Verhaltensweisen den Ozean wiederbevölkerten. Nach seinem ersten Aufkommen hatte es der *Ichthyosaurus* jedoch schwer, als in der späten Trias erneut zahlreiche Arten ausstarben, auf dem Land wie im Meer.

Die weitere Entwicklung der Ichthyosaurier ist recht verworren. Paläontologen waren lange der Meinung, die Gruppe hätte im Jura sehr unter dem allgemeinen Verlust an Biodiversität gelitten und sich nie richtig davon erholt. Fossilienfunde legten nahe, dass nur eine Hand voll Arten, alle mit vergleichbarem Aussehen und ähnlicher Lebensweise, den Übergang vom Jura zur Kreidezeit vor 145 Millionen Jahren überlebten. Dann starb die ganze Gruppe in der mittleren Kreidezeit anscheinend aus. Möglicherweise, so dachten Experten, war die mangelnde Diversität der Grund dafür, dass sich die Ichthyosaurier-Arten nicht gegen Haie und andere neu aufkommende Meeresräuber behaupten konnten.

Die Erkenntnisse der letzten Jahre haben diesen Ablauf allerdings in Frage gestellt, nicht zuletzt dank Fischers Arbeiten. Die Forscher gehen davon aus, dass es in Teilen der frühen Kreidezeit fast so viele Ichthyosaurier-Spezies gab wie im Jura. Dabei zeigte sich, dass die Parvipelvia genannte Abstammungsgemeinschaft – die einzigen Ichthyosaurier, die von der Trias bis zur Kreidezeit überlebten – in der Mitte der frühen Kreidezeit eine größere Formenvielfalt hatte als in jeder anderen Phase ihres Auftretens. »Die Diversität des *Ichthyosaurus* besonders in der Kreidezeit war wesentlich größer, als wir bisher dachten«, erklärt Fischers Koautor Darren Naish von der University of Southampton im Vereinigten Königreich. Er spricht von einer wahren »Revolution der kreidezeitlichen Ichthyosaurier«.

Monster der Meere

Urtümliche Meeresreptilien, genannt Ichthyosaurier, beherrschten die Ozeane über weite Teile des Mesozoikums, als auch die Dinosaurier lebten. Sie entwickelten sich aus den am Land lebenden Reptilien und brachten in der frühen Trias eine enorme Vielzahl agiler Schwimmer hervor, darunter einige der größten Meeresräuber ihrer Epoche.

1 Zähne

Die Ichthyosaurier entwickelten sehr spezialisierte Zähne, die ihre Vielfalt an Ernährungsweisen widerspiegeln. Manche hatten starke Zähne und jagten Vögel oder Meeresschildkröten, andere hatten kleine und empfindliche Zähne zum Verspeisen von Weichtieren. Einige hatten gar keine Zähne und sogen ihre Beute wahrscheinlich ein.



Temnodontosaurus platyodon

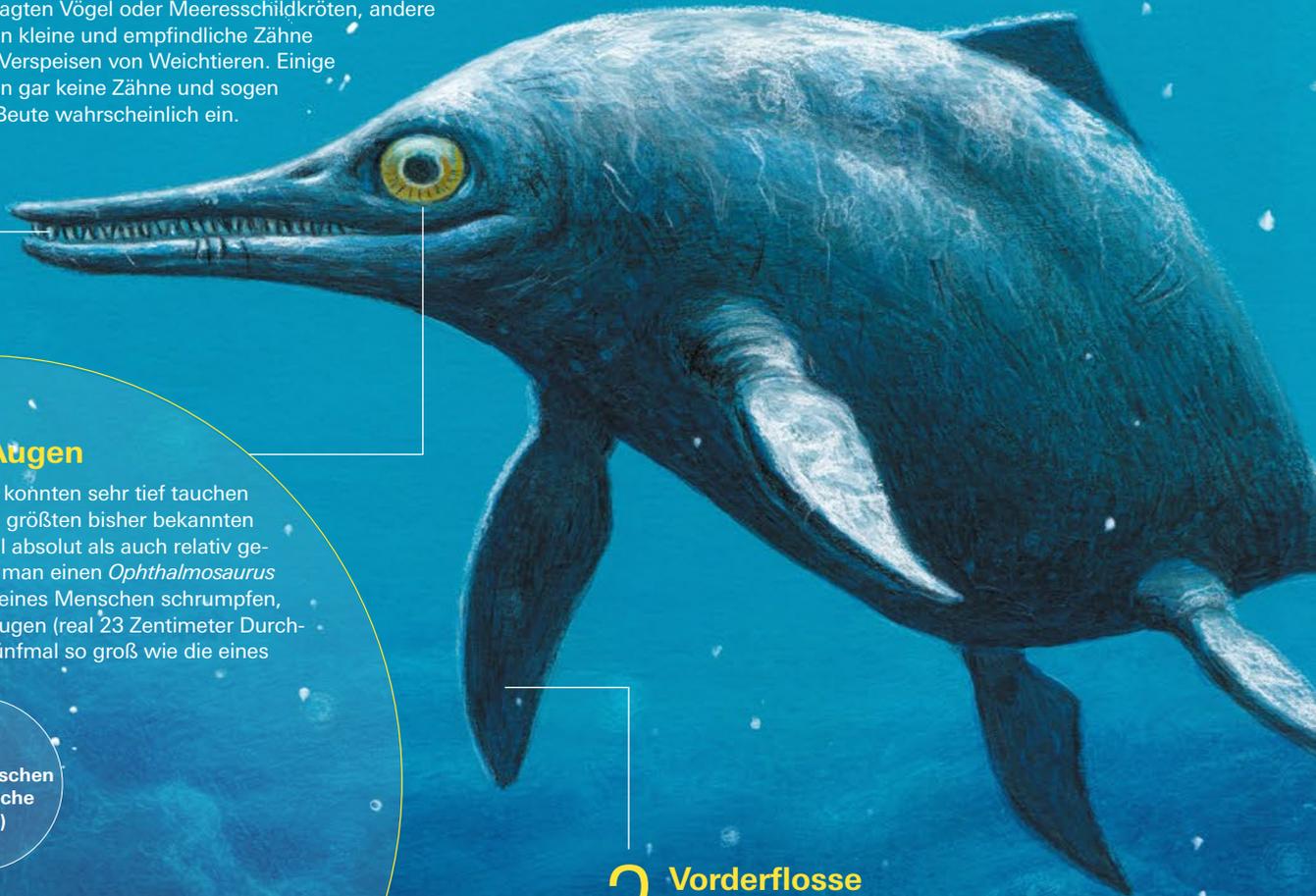
Der erste 1814 in einer Veröffentlichung beschriebene *Ichthyosaurus*: Mit etwa neun Metern Länge war er ein riesiger Räuber aus dem frühen Jura.

2 Riesige Augen

Ichthyosaurier konnten sehr tief tauchen und hatten die größten bisher bekannten Augen, sowohl absolut als auch relativ gesehen. Würde man einen *Ophthalmosaurus* auf die Größe eines Menschen schrumpfen, wären seine Augen (real 23 Zentimeter Durchmesser) fast fünfmal so groß wie die eines Menschen.

Auge eines Menschen (tatsächliche Größe)

Auge eines *Ophthalmosaurus* (auf Mensch skaliert)



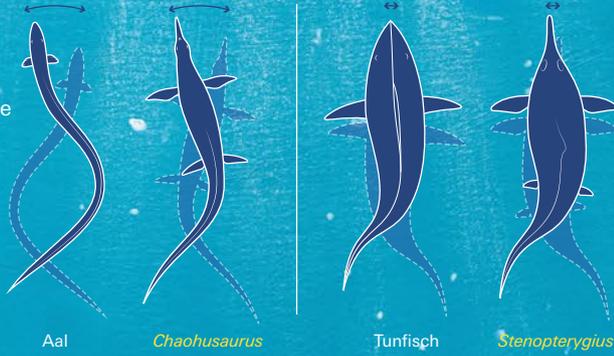
3 Vorderflosse

Die Vorderflossen des *Ichthyosaurus* entwickelten sich aus Gliedmaßen, die ursprünglich für die Bewegung an Land angepasst waren. Im Lauf der Zeit verkürzte sich der Unterarm, neue Knochen bildeten sich an der ehemaligen Hand und formten eine Art Paddel.



4 Schwimmstile

Frühe Ichthyosaurier schlängelten sich wie Aale von Seite zu Seite, während spätere Spezies eine starre Wirbelsäule hatten, eher wie Tunfische schwammen und schneller wurden.



Aal

Chaohusaurus

Tunfisch

Stenopterygius

5 Beute

Wie der Mageninhalt versteinertes *Ichthyosaurus*-Exemplare erkennen lässt, fraßen manche Arten urtümliche, tintenfischähnliche Lebewesen (Belemniten). Andere ernährten sich von verschiedenen Molluskenarten, Fischen und kleinen Ichthyosauriern.

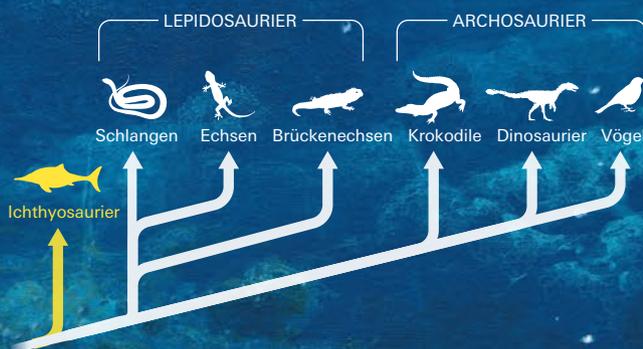


6 Farbe

Fossilienfunde zeigen, dass tief tauchende Ichthyosaurier eine dunkle Hautpigmentierung hatten, ähnlich den Fischen und Walen, die heute im tiefen Ozean leben.

7 Evolution

Wer die Vorfahren der Ichthyosaurier waren, ist unklar. Analysen diverser Fossilien legen nahe, dass sie sich von anderen Reptilien schon abgespalten hatten, bevor die Evolution von Lepidosauriern und Archosauriern auseinanderwich.



Lange Herrschaft

Die Ichthyosaurier waren erstaunlich erfolgreich und lebten von vor fast 250 bis vor 94 Millionen Jahren. In dieser Zeit entwickelten sie eine riesige Zahl verschiedener Körperformen und -größen. Einige Arten waren an das Leben in der Tiefsee adaptiert, andere durchquerten die flacheren Küstengewässer.



1,8 Meter



Platypterygius australis:

Größe bis etwa sieben Meter. Bissspuren auf einigen Knochen weisen auf Kämpfe unter den Speziesmitgliedern hin.

Ophthalmosaurus:

Große Augen und weitere Merkmale deuten darauf hin, dass diese Gattung extrem tief schwimmen konnte.



Excalibosaurus:

Der lange Oberkiefer der Gattung legt nahe, dass sie möglicherweise durch Vor- und Zurückwippen des Hinterkopfes jagte, ähnlich den heutigen Schwertfischen.



Shonisaurus sikanniensis:

Diese riesige Spezies aus der Trias wurde mehr als 20 Meter lang und hatte anscheinend im Erwachsenenalter keine Zähne. Möglicherweise ernährte sie sich durch Aufsaugen der Beute.

Mixosaurus:

Manche Exemplare dieser Gattung kleiner, früher Ichthyosaurier maßen nicht einmal zwei Meter.



vor 100 Mio. Jahren

vor 150 Mio. Jahren

vor 200 Mio. Jahren

Oberkreide

Unterkreide

Oberjura

Mitteljura

Unteljura

Obertrias

Mitteltrias

Untertrias



NATURAL HISTORY MUSEUM, LONDON / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Dieses Fossil von *Stenopterygius acutirostris* wurde in Deutschland gefunden. Es befindet sich heute im National History Museum in London. Die Umriss der Flossen zeichnen sich gut in Form dunkler Bereiche ab. Die Art lebte bis vor etwa 180 Millionen Jahren und bewegte sich wohl ähnlich wie heutige Tunfische mit kräftigen Schwanzschlägen durch den offenen Ozean.

Später traf es die Ichthyosaurier dafür umso heftiger, wie Fischers Analysen ergaben. Vor etwa 100 Millionen Jahren starben viele Arten aus, und die wenigen Überlebenden folgten etwa fünf bis sechs Millionen Jahre später. Die Ursachen suchte Fischer bei Umweltfaktoren und fand tatsächlich eine Korrelation von Klima und Aussterben: Je höher die Temperaturschwankungen in einer bestimmten Periode waren, desto mehr *Ichthyosaurus*-Spezies verschwanden währenddessen. Auch laut anderen Wissenschaftlern könnten Klimaveränderungen wesentlich zum Aussterben der Urtiere beigetragen haben. Sie »bieten die bisher beste hypothetische Grundlage und passen ebenfalls gut zu den bekannten Risiken für das Aussterben großer Raubtiere in unserer Zeit«, erklärt Maxwell.

Wie konnte eine so erfolgreiche Tiergruppe vollständig verschwinden?

Für das Leben im Ozean bot die mittlere Kreidezeit ein schwieriges Umfeld. Der Ichthyosaurier starb aus, als der Meeresspiegel hoch und der Sauerstoffgehalt des Wassers niedrig war. Viele andere Meereslebewesen, beispielsweise die Ammoniten, kämpften gleichfalls mit dem Überleben; der Ichthyosaurier sei da vielleicht »nur eine kleine Facette von etwas viel Größerem«, überlegt Fischer. Er untersucht nun, ob anderen Meeresräubern der Kreidezeit dasselbe Schicksal widerfuhr. Allerdings stimmen nicht alle Experten Fischers Interpretationen zu. Motani etwa findet das beschriebene Szenario zwar plausibel, die statistische Auswertung der Daten zur Bestimmung des Zeitraums will er so aber nicht akzeptieren. Fischer stellt das Verschwinden der Reptilien in den Zeitraum vor etwa 94 Millionen Jahren. Wenn sie aber zu einer anderen Zeit ausstarben, wäre die Korrelation zwischen ihrem Schicksal und den Klimaschwankungen weniger deutlich. Trotzdem steht Fischer zu seiner Schlussfolgerung und hofft, dass mehr Fossilien aus der Kreidezeit auftauchen und die Hypothese untermauern.

Die Diskussion über das Ende der Ichthyosaurier wird noch einige Zeit andauern, während sich die Wissenschaftler auf die Suche nach der treibenden Kraft hinter dem vollständigen Verschwinden einer so erfolgreichen Tiergruppe machen. Sie hoffen außerdem klären zu können, was am Ende der Trias geschah, als viele Ichthyosaurier ausstarben. Dabei würden mehr Fossilien und Techniken zur besseren Sedimentdatierung helfen, um die Geschichte der Arten wesentlich genauer zu schreiben.

Die neu aufkommenden Diskussionen und der intensivere Wettbewerb in seinem Feld stören Motani nicht. Im Gegenteil, er sehnt keineswegs die Tage zurück, als es außer ihm so wenige Ichthyosaurier-Spezialisten gab, dass es für Fachjournale sogar schwierig war, Experten für die Begutachtung seiner Arbeiten zu finden. Nun freut er sich darüber, dass den Ichthyosauriern endlich die Aufmerksamkeit zuteilwird, die ihnen schon lange zusteht. ◀

QUELLEN

- Fischer, V. et al.:** Extinction of Fish-Shaped Marine Reptiles Associated with Reduced Evolutionary Rates and Global Environmental Volatility. In: Nature Communications 7, 10825, 2016
- Fröbisch, N. B. et al.:** Macropredatory Ichthyosaur from the Middle Triassic and the Origin of Modern Trophic Networks. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 110, S. 1393–1397, 2013
- Jiang, D.-Y. et al.:** A Large Aberrant Stem Ichthyosauriform Indicating Early Rise and Demise of Ichthyosauromorphs in the Wake of the End-Permian Extinction. In: Scientific Reports 6, 26232, 2016
- Motani, R. et al.:** A Basal Ichthyosauriform with a Short Snout from the Lower Triassic of China. In: Nature 517, S. 485–488, 2015
- Stanley, S. M.:** Estimates of the Magnitudes of Major Marine Mass Extinctions in Earth History. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 113, S. E6325–E6334, 2016

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 543, S. 603–607, 30. März 2017

Unsere Neuerscheinungen!



Medizin: Menschendesign durch Gentherapie • Gesellschaft: Die Kluft zwischen Arm und Reich wächst • Anthropozän: Wie wir die Erde verändern • Gerontologie: Der Methusalem-Effekt • € 8,90 (erscheint am 28.7.2017)



Quantengravitation: Die Theorien werden überprüfbar • Dunkle Materie: Neue Bewegungsgesetze statt unsichtbarer Teilchen? • Schwarze Löcher: Wie Verschränkung ein Wurmloch erzeugt • € 8,90



Stonehenge: War der Steinkreis eine Stätte des Todes oder der Heilung? • Indien: Nalanda, die älteste Universität der Welt • Kathedralen: Romanik und Gotik – Tradition kontra Moderne • € 8,90



Die Geburt der Sterne: Neue Sonnen entstehen in riesigen Molekülwolken • Super-Erden en masse: Um viele Sterne kreisen erdähnliche Planeten • Das Klima fremder Welten: Suche nach Lebensspuren in den Gashüllen ferner Planeten • € 8,90



Einschulung: Wann ist ein Kind schulreif? • Naturerfahrung: Warum sie die Konzentration verbessert • Inklusion: Ein Vorteil für alle? • Keine Lust auf Hausaufgaben? So können Eltern helfen • Psychopharmaka für Kinder? • € 8,90



Fettleibigkeit: Übergewicht durch Darmflora • Nachgefragt: Besteht der Mensch aus mehr Bakterien als Körperzellen? • Darm-Hirn-Achse: Wenn der Bauch das Gehirn krank macht • € 5,90

Hier bestellen:
service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum.de/neuerscheinungen

**Ausgewählte
 Sonderhefte
 auch im
 PDF-Format**

TOXIKOLOGIE

VORSICHT, TRINKWASSER!

Seit Jahrzehnten gelangen in den Industrienationen so genannte Perfluor-carbone in die Umwelt. Aktuell diskutieren Wissenschaftler und Behörden mögliche Gesundheitsgefahren durch die nicht abbaubaren chemischen Verbindungen. Doch das tatsächliche Risiko ist schwer zu beziffern.



Charles Schmidt arbeitet als Journalist in Portland, Maine. Vor seiner Tätigkeit als Reporter hat er Gesundheitswissenschaften studiert und als Toxikologe für eine Umweltberatungsfirma gearbeitet.

► spektrum.de/artikel/1478211

Fast 10 000 Menschen arbeiten im Gewerbegebiet Pease International Tradeport in der Hafenstadt Portsmouth in den Vereinigten Staaten. Darunter lauert ein giftiges Erbe. Bis 1988 war hier ein Stützpunkt der US Air Force. Zu Übungszwecken setzte die Feuerwehr damals alte Flugzeuge in Brand und löschte die Flammen mit einem Schaum aus Chemikalien. Dieser versickerte im Boden und kontaminierte das Grundwasser, das die Bewohner heute verwenden.

2015 nahmen Wissenschaftler Proben des Trinkwassers und entdeckten darin Poly- und Perfluorcarbone (PFC). Das sind verschiedene chemische Verbindungen, bei denen die Wasserstoffatome in Ketten von Kohlenwasserstoffen teilweise beziehungsweise vollständig durch

Fluor ersetzt worden sind. Diese Fluorkohlenstoffe sind äußerst reaktionsträge und bilden auf Oberflächen dünne, widerstandsfähige Filme. Darum lassen sich mit PFC-haltigem Löschschaum Feuer gut ersticken. Aus den gleichen Gründen werden sie in der Natur praktisch nicht abgebaut.

Die gemessenen Konzentrationen waren 35-mal höher, als die US-Umweltbehörde Environmental Protection Agency (EPA) empfiehlt. PFC werden seit Jahrzehnten überall auf der Erde in zahllosen Konsumartikeln verwendet und haben sich im Boden und im Grundwasser verteilt. Je intensiver Forscher danach suchen, desto mehr kontaminierte Orte finden sie. So gut wie jeder Mensch in den Industrienationen hat PFC-Moleküle aus dem Trinkwasser



JESSE BURKE

In vielen Regionen der Welt, auch in Deutschland, gelangen chemische Stoffe ins Grundwasser und damit ins Leitungswasser, die nicht abgebaut werden und sich im Körper anreichern. Den Behörden fällt es schwer, anzugeben, welche Mengen bedenkenlos dauerhaft getrunken werden können.

oder den Nahrungsmitteln im Blut. In Regionen, wo PFC oder Produkte aus ihnen hergestellt wurden, reichern sich die Chemikalien besonders stark an. Wer in solchen Gegenden lebt, hat meist deutlich erhöhte Konzentrationen der Stoffe im Körper.

Als sich 2016 die Hinweise häuften, dass PFC vor allem für Kinder giftig sind, senkte die EPA die Richtwerte für zwei der schädlichsten und am weitesten verbreiteten Verbindungen im Trinkwasser auf einen neuen Tiefstwert von 70 Teilen pro Billion (englisch: parts per trillion, ppt) oder dem Äquivalent von einem Tropfen in 20 Olympia-

Praktisch jedes irgendwann einmal produzierte PFC-Molekül befindet sich noch irgendwo auf der Erde

schwimmbecken. In zwei Dutzend US-Staaten liegen die Werte für das Trinkwasser in einigen Gemeinden über dieser neuen Marke.

Zwischen 2013 und 2015 überprüfte die EPA jedes Wasserwerk, das mehr als 10 000 Menschen versorgt. Bei 66 der Anlagen, zuständig für insgesamt sechs Millionen Amerikaner, lagen die Konzentrationen an PFC in dem Zeitraum mindestens einmal über den neuen Richtwerten (siehe »Allgegenwärtige Chemikalien«, rechts). Viele Bundesstaaten werden nun aktiv. Im Juli 2016 empfahlen die Gesundheitsämter 100 000 Bewohnern im nördlichen Alabama, das kontaminierte Leitungswasser nicht zu trinken. In Pennsylvania schlossen die Behörden im Oktober 2016 22 öffentliche und 150 private Trinkwasserbrunnen. In Ohio und West Virginia haben 3500 Bürger DuPont verklagt, einen der größten PFC-Hersteller. Sie behaupten, Krebs und andere Krankheiten würden wegen

eines DuPont-Werks rund um den gemeinsamen Grenzfluss häufiger auftreten. Offizielle Stellen legten den Bewohnern in Hoosick Falls im Staat New York 2015 nahe, das mit PFC belastete Leitungswasser nicht zu trinken. »Wahrscheinlich haben wir das Problem in seinem ganzen Ausmaß überhaupt noch nicht erfasst«, sagt David Andrews, Wissenschaftler der Umweltorganisation Environmental Working Group in Washington, D.C.

Hohe Blutkonzentrationen von PFC könnten Krebs auslösen, das Immunsystem schwächen und zu Fortpflanzungsstörungen führen. Es ist aber völlig unklar, ab welcher Menge die Gesundheit von Menschen gefährdet ist. Wir nehmen PFC nicht nur mit dem Trinkwasser auf, sondern auch über Nahrungsmittel und Konsumprodukte.

PFC wurden in den 1940er Jahren von der Minnesota Mining and Manufacturing Company, heute 3M genannt, entwickelt und seitdem in großen Mengen produziert. Verwendet man sie beispielsweise als Beschichtung von Jacken, perlen Wasser, Fett und Schmutz an der dauerhaften und undurchdringlichen Lage ab. PFC kamen lange Zeit auch in Küchenutensilien oder Lebensmittelverpackungen vor, beispielsweise Antihaftpfannen oder Popcornütten. Mit Hilfe dieser Chemikalien kann man andere Beschichtungen wie Teflon leichter auf Oberflächen aufbringen. In den anschließenden Produktionsschritten sollte das PFC wieder entfernt werden, aber Untersuchungen dazu, ob das vollständig gelang, liefern widersprüchliche Ergebnisse. Die PFC könnten also später bei Kontakt mit Nahrungsmitteln an diese abgegeben worden sein.

Vor allem die langkettigen Moleküle verbleiben jahrelang im Körper

Die Verbindungen wurden von vielen Herstellern weiterentwickelt und verbreitet verwendet. Heute sind mehr als 3000 unterschiedliche PFC im Umlauf. Ihre Stabilität, die bei der Herstellung zahlreicher Produkte so erwünscht war, erweist sich nun als Nachteil für die Umwelt und unsere Gesundheit. Die Moleküle aus Kohlenstoff und Fluor sind unnatürlich und können im Boden von Mikroorganismen nicht abgebaut, von der Sonne kaum zerstört und in Pflanzen, Tieren und Menschen nicht verstoffwechselt werden. Praktisch jedes irgendwann einmal produzierte PFC-Molekül befindet sich noch irgendwo auf der Erde. Wissenschaftler entdeckten PFC unter anderem in Eisbären, Walen, Fischen und landwirtschaftlichen Erzeugnissen.

Viele Jahre lang wurden vor allem langkettige PFC mit acht oder mehr Kohlenstoffatomen eingesetzt. Die beiden häufigsten sind Perfluorooctansäure (PFOA), etwa bei der Herstellung von Teflon und GoreTex, sowie Perfluorooctansulfonsäure (PFOS), ein Bestandteil von Löschschaum und aufsprühbarem Imprägniermittel. Im Gegensatz zu Schadstoffen wie Dioxin oder DDT, die sich vor allem im Fettgewebe anreichern, gehen PFC ins Blut und könnten deswegen von den Nieren herausgefiltert werden. Diesen gelingt das bei langkettigen PFC nicht gut, so dass Letztere kaum mit dem Urin ausgeschieden werden und jahrelang im Körper verbleiben.

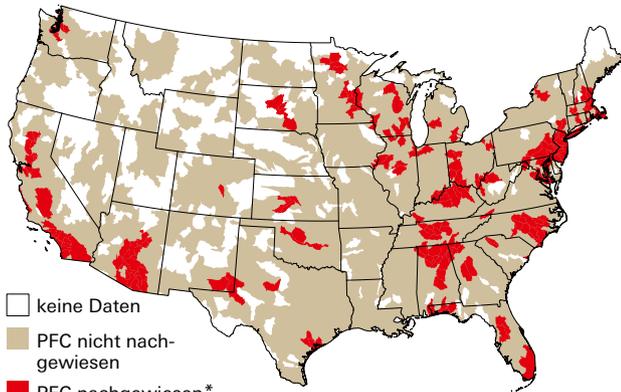
AUF EINEN BLICK ÜBERALL UND UNZERSTÖRBAR

- 1 Poly- und perfluorierte Verbindungen (PFC) dienen seit Langem zur Herstellung vieler Konsumartikel, etwa regenfester Funktionskleidung. Sie kommen nicht natürlich vor und werden in der Umwelt kaum abgebaut.
- 2 Einige der Moleküle können sich im Körper anreichern. Studien deuten auf mögliche Zusammenhänge zwischen hohen PFC-Konzentrationen und Gesundheitsproblemen bei Menschen in belasteten Gebieten.
- 3 Es ist schwierig, die Auswirkungen zu bestimmen und Grenzwerte festzulegen. Tierversuche lassen sich oft nicht auf andere Arten übertragen, und epidemiologische Studien liefern keine eindeutigen Ergebnisse.

Allgegenwärtige Chemikalien

Mehr als sechs Millionen US-Amerikaner werden mit Trinkwasser versorgt, das PFC in Konzentrationen über dem empfohlenen Richtwert enthält. Das ergab eine Erhebung von Xindi Hu von der Harvard University. Gemeinden mit weniger als 10 000 Bürgern und private Brunnen sind nicht untersucht worden, deshalb könnten die wirklichen Zahlen sogar höher sein.

MAPPING SPECIALISTS, MACH, HU, X.C. ET AL.: DETECTION OF POLY- AND PERFLUORODIALKYL SUBSTANCES (PFAS) IN U.S. DRINKING WATER LINKED TO INDUSTRIAL SITES, MILITARY FIRE TRAINING AREAS, AND WASTEWATER TREATMENT PLANTS. IN: ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY LETTERS 3. S. 384–390, 2016 / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2017



*POSTLEITZAHLENBEREICHE, IN DENEN ZWISCHEN 2013 UND 2015 BEI MINDESTENS EINER WASSERPROBE ERHÖHTE WERTE VON PERFLUORCARBONEN VORGEKOMMEN SIND.

Anfang des 21. Jahrhunderts haben die meisten großen Chemiekonzerne in den Vereinigten Staaten, Europa und Australien gemeinsam beschlossen, bis 2015 zumindest die langkettigen PFC weitgehend auszumustern und durch Alternativen zu ersetzen, etwa kurzkettenige PFC, die der Körper innerhalb weniger Tage ausschwemmt. Doch auch sie bleiben in der Umwelt. In den Haushalten gibt es zudem einerseits ältere Produkte, die diese Chemikalien weiterhin enthalten. Andererseits haben sich einige Unternehmen dem freiwilligen Programm gar nicht erst angeschlossen; chinesische Hersteller produzieren bis zu 300 Tonnen PFOA und PFOS jährlich. Man verwendet sie beispielsweise für wasserfeste Sportbekleidung und für Schmutz abweisende Möbelpolsterungen und Teppiche. 2015 haben mehr als 200 Wissenschaftler die so genannte Erklärung von Madrid unterzeichnet, in der sie die weit verbreitete Verwendung von PFC und die zu geringe Information der Öffentlichkeit über deren Eigenschaften und Auswirkungen anprangern.

Vor dem freiwilligen Ausstieg von Teilen der Industrie aus den langkettigen PFC waren Verpackungen für Nahrungsmittel und Textilien die größte alltägliche Quelle für Belastungen. Inzwischen sind es vor allem Fisch und landwirtschaftliche Produkte. Seit die langkettigen PFC nicht mehr verwendet werden, fallen deren Konzentration im Blut langsam wieder. 1999 führte die Gesundheitsbehörde der USA, die Centers for Disease Control and Prevention (CDC), die ersten entsprechenden Tests durch. Damals lagen die PFOA-Spiegel im Blut von US-

Amerikanern knapp über 5 Mikrogramm pro Liter; 2012 waren sie nur noch halb so hoch. Die durchschnittlichen PFOS-Werte haben im gleichen Zeitraum in den Vereinigten Staaten noch stärker abgenommen, von 30 auf gerade einmal 6 Mikrogramm pro Liter. Dies ist nur ein geringer Trost für Menschen, die in den zahlenmäßig zunehmenden Gebieten mit PFC-kontaminiertem Trinkwasser leben. Im Juni 2016 berichteten die Behörden von New Hampshire von einer Untersuchung in dem Gewerbegebiet von Portsmouth. Jeder der fast 1600 überprüften Menschen – ein Viertel davon Kinder aus den dortigen Tagesstätten – wies PFC-Konzentrationen auf, die den Richtwert deutlich überschritten. Die größten Mengen wurden bei Menschen in der Nähe der Chemiefabrik von DuPont in Wood County, West Virginia, festgestellt. Die Konzentrationen von PFOA bei den etwa 70 000 Einwohnern lagen durchschnittlich bei 82 Mikrogramm pro Liter. Doch laut Kyle Steenland, Epidemiologe und Professor an der Rollins School of Public Health der Emory University, betrug die höchsten Werte 1000 Mikrogramm pro Liter! Wahrscheinlich leben hunderttausende US-Bürger in Gegenden mit zu hohen PFC-Belastungen durch Militärgelände, Chemiefabriken und Abwasseraufbereitungsanlagen. Ganz zu schweigen von den Millionen Betroffenen in anderen Industrieländern.

Studienergebnisse variieren von Tierart zu Tierart – und selbst zwischen Untersuchungen bei Menschen

Es ist schwer herauszufinden, ab welcher Konzentration PFC gefährlich werden. Patrick Breyse, Direktor des National Center for Environmental Health der CDC in Atlanta, bekräftigt: »Ich werde oft gefragt, wie PFC möglicherweise schaden. Darauf gibt es keine klare Antwort. Wir können zwar ihre Konzentrationen messen, aber wir wissen nicht genau, welche Folgen sie für den menschlichen Körper haben.« Studien liefern kein eindeutiges Bild. PFC haben diverse Auswirkungen auf Tiere, aber je nach Art ganz unterschiedliche. Selbst die Ergebnisse für Menschen variieren von Untersuchung zu Untersuchung; einige deuten auf nachteilige Einflüsse, andere nicht. Benjamin Chan, Epidemiologe im Department of Health and Human Services in New Hampshire, erläutert das Problem: »Menschen möchten die Konzentrationen in ihrem Blut mit denen vergleichen, die in bestimmten Studien Schäden anrichten, aber die Qualität einer einzelnen Studie ist für sich genommen meist nicht sehr hoch. Die Ergebnisse sind darum insgesamt oft verwirrend und schwer zu werten.« Seit 2000 wissen Forscher, dass PFC bei Ratten Leber-, Hoden- und Pankreaskrebs verursachen können, bei Affen jedoch wohl nicht. Lebervergrößerung, Immunschwäche, neurologische Veränderungen, Fettleibigkeit und Verzögerung der Brustdrüsenentwicklung wurden bei verschiedenen Tierarten dokumentiert. Die EPA begründet ihre neuen Richtwerte mit Studien an Mäusen, deren Mütter PFC ausgesetzt waren – die Nachkommen haben ein geringeres Geburtsgewicht, Knochenprobleme und werden schneller geschlechtsreif.

Während Forscher Tieren in kontrollierten Studien PFC verabreichen können, kommen bei Menschen nur epide-

miologische Erhebungen in Frage. Das heißt, man findet heraus, ob in Gemeinden mit einer höheren PFC-Belastung tatsächlich mehr Krankheiten auftreten. Dabei kommen aber auch weitere mögliche Ursachen in Betracht, etwa Rauchen, Ernährungsgewohnheiten und andere Chemikalien. All das könnte die wahren Auswirkungen von PFC verschleiern. Steenland sagt, am einfachsten ließen sich große Gruppen von stark exponierten Menschen untersuchen, weil Veränderungen der Häufigkeit von bestimmten Krankheiten hier leichter auffielen. Ein Beispiel ist die Bevölkerung in der Nähe des DuPont-Chemiewerks in West Virginia. Hier gelangten ein halbes Jahrhundert lang



Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

PFOA in den Fluss Ohio und sickerten von dort aus in das umliegende Grundwasser. Die Konzentrationen erreichten teilweise mehr als 4000 ppt.

Auch die Reaktion des Immunsystems auf Impfungen könnte betroffen sein

Auf Grund eines Vergleichs in einer Sammelklage gegen DuPont im Jahr 2004 verpflichtete sich die Firma zu einem 35-Millionen-Dollar-Programm, um etwaige gesundheitliche Auswirkungen zu untersuchen. Die so genannte C8-Studie zeigte »mögliche Verbindungen« zwischen der PFOA-Belastung im Trinkwasser der untersuchten 69 000 Bürger und verschiedenen Beschwerden: Nieren- und Hodenkrebs, Colitis ulcerosa, Erkrankungen der Schilddrüse, Hypercholesterinämie und Schwangerschaftshypertonie. Steenland, einer der Studienleiter, erkennt zwar eine Tendenz, dass der Kontakt mit PFOA und diese Krankheiten miteinander in Zusammenhang stehen. »Damit ist aber noch lange nicht definitiv klar, ob PFOA tatsächlich für eine dieser Krankheiten ursächlich verantwortlich sind«, fügt er hinzu. »Unsere Daten sind schon ziemlich belastbar, doch eine einzige große Studie reicht nicht aus. Wir müssen auch andere Populationen untersuchen.« Weitere Erhebungen könnten ebenfalls nötig sein, um negative Auswirkungen auf das sich entwickelnde Immunsystem von Kindern bei schon geringen PFC-Belastungen festzustellen. Wird ein Kind zum Beispiel gegen Masern geimpft, reagiert sein Körper mit der Bildung von Antikörpern. Kommt er dann später mit dem Virus in Kontakt, kann sein Immunsystem ihn sofort effektiv bekämpfen. Möglicherweise behindern PFC die normale Antwort des Körpers auf Impfungen und reduzieren den Impferfolg. 2012 berichteten Wissenschaftler von der Harvard University, dass die Antikörperkonzentrationen nach einer Diphtherie- und Tetanusimpfung mit steigender PFC-Belastung

der untersuchten Kinder abnahmen. Die entsprechende Studie wurde auf den Färöer-Inseln vor Norwegen durchgeführt, wo die Menschen die PFC hauptsächlich über ihre Ernährung mit Walfleisch und anderen Meerestieren aufnehmen. Kinder und Schwangere weisen dort ähnlich hohe Werte auf wie die durchschnittliche US-Bevölkerung. Philippe Grandjean, Professor an der Harvard T. H. Chan School of Public Health und Leiter dieser Studie, befürchtet, Kinder mit erhöhten PFC-Konzentrationen könnten schlechter auf Impfungen reagieren. Laut Andrew Rooney, einem Toxikologen der National Institutes of Health, zeigen Studien an Mäusen das Gleiche: Sowohl PFOA als auch PFOS unterdrücken bei Tieren die Antikörperbildung. »Da wir hier bei Tieren und Menschen ähnliche Effekte feststellen, können wir den Studienergebnissen eher vertrauen. Wir erwarten also eine weniger effektive Immunreaktion auf Impfstoffe bei Menschen, die höhere PFC-Konzentrationen in ihrem Körper haben«, so Rooney. Die vergleichbaren Ergebnisse zeigten sich bislang jedoch nur bei Mäusen. Weder Ratten noch Affen reagierten entsprechend.

Im Rahmen der C8-Studie haben die Forscher die Antikörperbildung bei Menschen aus den stark belasteten Gemeinden in Ohio und West Virginia untersucht. Die Antikörperkonzentrationen waren bei einer von drei verschiedenen Grippeimpfungen etwas unterdrückt; zu mehr Grippefällen kam es jedoch nicht. Tony Fletcher, Epidemiologe an der London School of Hygiene & Tropical Medicine und einer der C8-Studienleiter, fragt sich nun, warum seine Studie und diejenige von Grandjean so unterschiedliche Resultate zeigen: »Eigentlich würde man deutlichere Auswirkungen erwarten, wenn die Belastung höher ist.«

Epidemiologen brauchen Geduld. Steenland hofft, dass Ergebnisse weiterer Studien aus anderen Teilen der Welt

Die unklare Datenlage und knappe Ressourcen könnten die Anstrengungen zum Erliegen bringen, Standards festzulegen

zur Klarheit beitragen. Empfehlungen können jedoch nur auf den bereits vorliegenden Daten basieren, und die Experten sind sich über deren Interpretation oft nicht einig. Die Behörden in New Jersey beispielsweise unterboten den EPA-Richtwert für PFOA, sie empfehlen 14 statt 70 ppt. Ihrer Meinung nach schützen geringere Werte eher vor Lebervergrößerung und der Verzögerung der Brustdrüsenentwicklung; diese Wirkungen wurden bei Mäusen schon bei geringsten Konzentrationen beobachtet. Auf eine Nachfrage bei der EPA, warum sie hier nicht gleichziehe, antwortete ein Sprecher, dass die Agentur die Leberveränderungen bei den Nagern nicht als beeinträchtigend einschätze und dass man die Ergebnisse wegen anderer biologischer Mechanismen womöglich ohnehin nicht auf Menschen übertragen könne. Der Sprecher

schrieb auch, die Verzögerung der Brustdrüsenentwicklung bei den Tieren behindere die Milchbildung oder das Stillen nicht. Grandjean fordert hingegen maximal ein ppt im Trinkwasser, was seiner Meinung nach nötig ist, um immunologische Auswirkungen bei Kindern zu verhindern.

Richtwerte sind nur ein erster Schritt, verbindliche Grenzwerte sind das Ziel

Eine unklare Datenlage, zu knappe finanzielle und personelle Ressourcen, zurückhaltende Gesetzgeber und gegensätzliche Interessen von Umweltgruppen und Industrie könnten die Anstrengungen der EPA zum Erliegen bringen, verbindliche Standards für das Trinkwasser festzulegen. »Untersuchungen über die Auswirkungen von Chemikalien auf die Gesundheit werden oft endlos verzögert«, sagt Andrews von der Environmental Working Group. »Doch die EPA muss diese Bewertungen abschließen, bevor sie Grenzwerte nach dem Safe Drinking Water Act festlegen kann.« Die aktuellen Richtwerte für PFC sind nämlich kaum mehr als eine Vorsichtsmaßnahme. Wasserwerke

müssen die PFC-Konzentrationen nicht einmal bestimmen; viele tun es inzwischen allerdings auf Grund des wachsenden öffentlichen Drucks.

Streitigkeiten um weitere Stoffe im Trinkwasser, die geprüft und deren maximale Konzentrationen reglementiert werden sollen, binden zusätzlich Kapazitäten der EPA. Dazu gehören 1,4-Dioxan, Chrom-VI-Verbindungen und Perchlorate. Für Letztere wollte die EPA eigentlich bis Ende 2015 einen Höchstwert im Trinkwasser festlegen. Interne Diskussionen über die Toxizität der Chemikalie führten zu Verzögerungen; die EPA wird deshalb von der Umweltschutzorganisation Natural Resources Defense Council gerichtlich verfolgt. Deren Anwalt Erik Olsen beklagt, die notwendigen Studien der EPA würden zu viele Ressourcen verschlingen und Einmischungen der Industrie ermöglichen. »Die EPA ist nicht mehr handlungsfähig«, urteilt er. In einer E-Mail sagte ein Mitarbeiter der EPA, dass sie PFOA und PFOS gemäß den Vorgaben des Safe Drinking Water Act evaluieren, über den Zeitpunkt der Verlautbarung eines Grenzwerts aber keine Auskunft geben würde.

PFC in Deutschland und Europa

Perfluorierte Verbindungen im Grundwasser sorgen nicht nur in den USA für Schlagzeilen. In Deutschland wurden PFC seit 2006 in mehreren Bundesländern auf landwirtschaftlichen Flächen, in Flüssen und im Trinkwasser gefunden. Das Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie in Schmallenberg konnte sie sogar in Muttermilch nachweisen. 2009 sind PFC bei Analysen im Kölner Trinkwasser aufgetaucht. Hier waren Feuerlöschschäume von einem Werksgelände die Ursache.

Im Sommer 2013 gab es einen Zufallsfund im Grundwasser des baden-württembergischen Landkreises Rastatt. Seither wurden in der Region auf 400 Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche große Mengen PFC festgestellt. Möglicherweise hatten Landwirte die Böden zwischen 2005 und 2008 mit Kompost gedüngt, der massenhaft kontaminierte Papierschlämme enthielt. Zwei Wasserwerke sind inzwischen geschlossen, und in der Region angebaute Lebensmittel werden auf PFC-

Rückstände überprüft, bevor sie in den Handel dürfen. Eine Sanierung der betroffenen Flächen erscheint den Behörden derzeit nicht verhältnismäßig – Gutachter schätzen die Kosten auf mindestens einen dreistelligen Millionenbetrag.

In Deutschland legt das Umweltbundesamt (UBA) Leitwerte für Trinkwasser fest. Die letzte Bekanntmachung des UBA nach Anhörung der Trinkwasserkommission des Bundesministeriums für Gesundheit zu PFC wurde im Januar 2017 online publiziert. Das UBA beruft sich in seinen Bewertungen auch auf andere Institutionen, zum Beispiel US-amerikanische, und betont die teilweise Unsicherheit der Datenlage und Interpretationsspielräume. Die Empfehlungen für die langkettigen und potenziell besonders schädlichen Verbindungen PFOA und PFOS liegen laut der amtlichen Mitteilung bei jeweils 0,1 Mikrogramm pro Liter (das entspricht etwa 100 ppt). Das bedeutet, bis zu dieser Konzentration können alle Bevölkerungsgruppen das Trink-

wasser nach Einschätzung des UBA bedenkenlos lebenslang trinken. Nach Informationen der Energiewerke Rastatt lag der Wert der PFC-Gesamtsumme im Wasser des zuerst betroffenen Brunnens 2013 bei rund 0,3 Mikrogramm pro Liter, davon entfiel nur ein Hundertstel auf die Summe aus PFOA und PFOS. Einzelne Messstellen in der Region liefern jedoch weiterhin PFC-Gesamtwerte über zwei Mikrogramm pro Liter.

Auch in anderen Ländern Europas tauchen PFC an vielen Orten auf, sobald man danach sucht. Die Umweltschutzorganisation Greenpeace konnte die Verbindungen unter anderem in einem Schweizer Nationalpark nachweisen und prangert die Hersteller von Funktionskleidung an, die das Material beispielsweise für wasserfeste Jacken und Zelte verwenden. In Schneeproben aus Italien, der Slowakei sowie aus Finnland und Schweden fanden sich ebenfalls langkettige PFC. Manche Firmen haben auf Kritik reagiert und werben inzwischen mit PFC-freien Produkten.

Jahrzehntelang waren der EPA durch gerade jenes Gesetz die Hände gebunden, das ihr die Reglementierung oder das Verbot von Chemikalien erlaubte. Denn als der Toxic Substances Control Act (TSCA) 1976 in Kraft trat, fielen alle 62 000 Stoffe, die schon im Handel waren, unter eine Altfallregelung. Dazu gehörten die PFC. Auf Grund des TSCA fokussierte sich die EPA auf neue Verbindungen, und die bereits existierenden entgingen den Kontrollen. Charles Auer, heute Anwalt in Washington, D.C., leitete das EPA-Büro, das den TSCA umsetzte. Er umschiffte diese Einschränkungen, als er den freiwilligen Verzicht auf PFOA und PFOS koordinierte, und resümiert heute: »Die Tatsache, dass langkettige PFC zum großen Teil nicht mehr im Handel sind und die Konzentrationen im menschlichen Blut gefallen sind, zeigt den Fortschritt trotz der faktischen Schwäche des TSCA zu diesem Zeitpunkt. Wir haben das Problem der Produktion und Verwendung von PFC innerhalb von 15 Jahren weitgehend gelöst – das ist ein kurzer Zeitraum für so einen Prozess.«

Im Juni 2016 änderte der Kongress schließlich den TSCA, um der EPA mehr Einfluss auf bereits im Umlauf befindliche Chemikalien zu geben. Die EPA betrachtet PFC im Moment als Stoffe, die gemäß dem novellierten Gesetz evaluiert werden sollten. Sie sagt aber auch, dies habe keine hohe Priorität, weil sie schon Anstrengungen unternommen habe, um langkettige PFC vom Markt zu nehmen.

Auf Grund der regulatorischen und wissenschaftlichen Unsicherheiten wissen die Bürger in den Vereinigten Staaten immer noch nicht, ob die PFC in ihrem Trinkwasser gefährlich sind und was sie unternehmen sollen. Andrea Amico (Foto rechts) möchte erfahren, was PFC für die Gesundheit ihrer Familie bedeuten. Die Therapeutin



Andrea Amicos Ehemann und ihre Kinder haben erhöhte PFC-Konzentrationen in ihrem Blut. Sie gründete 2015 eine Aktionsgemeinschaft von Anwohnern der US-Stadt Portsmouth und versucht, die Behörden zu umfangreichen Tests zu bewegen.

Als ein Gesetz zur Reglementierung in Kraft trat, fielen alle Stoffe, die schon im Handel waren, unter eine Altfallregelung – auch die PFC

lebt in Portsmouth. Ihr Mann hatte, sieben Jahre bevor die Kontamination entdeckt worden war, eine Stelle in dem Gewerbegebiet angenommen. Die gemeinsamen Kinder besuchten die dortige Tagesstätte. Ihr Mann und ihre Kinder haben nun erhöhte PFC-Konzentrationen im Blut. 2015 rief Amico eine Aktionsgemeinschaft ins Leben und drängt die CDC, eine Langzeitstudie mit den 350 Kindern aus dem Gewerbegebiet zu initiieren.

Amico will eine Längsschnittstudie mit Blutproben und medizinischen Untersuchungen, bis die Kinder erwachsen werden. Es gibt bei PFC bisher zu wenige Daten zu Kindern und zu wenige Langzeitstudien. Im August 2016 erklärte Breyse von der CDC, seine Organisation zöge zwar eine Querschnittstudie in Betracht, um etwa den Cholesterinspiegel, die Immunabwehr und die Schilddrüsenhormone zu einem bestimmten Zeitpunkt zu untersu-

chen. Die Behörde hielt eine Längsschnittstudie aber für nicht sinnvoll, weil die Gruppe betroffener Kinder im Gewerbegebiet zu klein sei, um Veränderungen mit statistischer Relevanz feststellen zu können. Breyse findet es besser, die Kinder in eine größere nationale Erhebung einzugliedern. »Im Moment planen wir die Studie«, sagt Breyse, »und gleichzeitig wollen wir uns mit den Problemen einzelner Gemeinden beschäftigen.« Amicos größte Sorge ist die Ungewissheit: »Ich frage mich in schlaflosen Nächten, was diese Chemikalien für die Gesundheit meiner Kinder bedeuten.« ◀

QUELLEN

Grandjean, P., Clapp, R.: Changing Interpretation of Human Health Risks from Perfluorinated Compounds. In: Public Health Reports 129, S. 482–485, 2014

Hu, X. et al.: Detection of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in U.S. Drinking Water Linked to Industrial Sites, Military Fire Training Areas, and Wastewater Treatment Plants. In: Environmental Science & Technology Letters 3, S. 344–350, 2016

Steenland, K. et al.: Epidemiologic Evidence on the Health Effects of Perfluorooctanoic Acid (PFOA). In: Environmental Health Perspectives 118, S. 1100–1108, 2010



FREISTETTERS FORMELWELT GESTAUCHTE UND GEDEHNTE WELLEN

Den von Christian Doppler entdeckten Effekt nutzen wir heute überall in unserem Alltag. Ruhm hat er seinem Entdecker dennoch nicht gebracht.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«. [» spektrum.de/artikel/1478211](http://spektrum.de/artikel/1478211)

Wer zur Touristensaison nach Salzburg kommt, kann leicht auf die Idee kommen, die Stadt habe nur eine einzige bedeutende Person hervorgebracht: Wolfgang Amadeus Mozart. Alle Schaufenster zeigen Abbilder des musikalischen Wunderkindes; vor Mozarts Geburtshaus und den Mozartstatuen bilden sich fotografierende Menschentrauben – und seine Musik hört man überall in der Stadt. Erst wenn man den Trubel der Getreidegasse verlässt, findet man am Makartplatz auf der anderen Seite der Salzach eine eher unscheinbare Tafel. Sie verkündet, dass in diesem Haus der Physiker Christian Doppler (1803–1853) geboren wurde.

In seinem Werk »Ueber das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels« (1842) erklärte er, warum die Sterne unterschiedliche Farben haben. Sterne würden rot leuchten, wenn sie sich von uns entfernen, und blau, wenn sie sich auf uns zubewegen, weil die von ihnen ausgesandten Lichtwellen durch die Bewegung gestaucht beziehungsweise gedehnt würden. Dadurch verändere sich ihre Frequenz – und damit ihre Farbe. In moderner mathematischer Formulierung lautet der Effekt:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{\sqrt{c+v}}{\sqrt{c-v}}$$

In dieser Formel ist c die Lichtgeschwindigkeit, v die Relativgeschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger (zum Beispiel einem Stern und einem Teleskop auf der Erde), λ_0 ist die ursprüngliche Wellenlänge und λ die Wellenlänge, die letztlich beobachtet wird.

Doppler hatte korrekt beschrieben, was mit Signalen aus bewegten Quellen passiert. Allerdings bewegen sich Sterne zu langsam, um den Effekt hervorzurufen, den Doppler erklären wollte. Heute wissen wir, dass die Farben der Sterne durch ihre unterschiedlichen Temperaturen hervorgerufen werden.

Dennoch ist Dopplers Erkenntnis enorm wertvoll geworden. Der Quantenphysiker Anton Zeilinger nannte sie den »Jahrtausend-Effekt«. Zu Recht: Der erste Planet außerhalb des Sonnensystems wurde im Jahr 1995 entdeckt, weil die Astronomen im Licht eines Sterns durch den Doppler-Effekt hervorgerufene, periodische Farbänderungen beobachtet hatten. Der im Teleskop nicht sichtbare Planet bringt mit seiner Gravitationskraft seinen Stern ein wenig zum Wackeln, wodurch der sich periodisch auf die Erde zu- und von ihr wegbewegt. Mit dieser Methode entdeckten Wissenschaftler in den letzten Jahrzehnten Hunderte extrasolarer Planeten, sie erforschen damit aber auch die Bewegung von Doppelsternen oder untersuchen die Rotation von Galaxien.

Beim »Doppler-Radar« schickt man Radiowellen in Richtung eines sich bewegenden Objekts und berechnet aus der Frequenzänderung des dort reflektierten Signals dessen Geschwindigkeit. Mit dieser Technik verfolgen etwa Meteorologen die Bewegung von Tornados. Man kann damit jedoch genauso gut Flugzeuge überwachen oder das Tempo von Autos im Straßenverkehr kontrollieren. Mit der Laser-Doppler-Anemometrie misst man berührungslos die Geschwindigkeit strömender Gase oder Flüssigkeiten. Der Doppler-Effekt muss bei der Kommunikation mit Satelliten berücksichtigt werden; er hilft den Astronomen, die Temperatur im Inneren von Sternen zu messen oder die Form von Asteroiden zu bestimmen. Und er funktioniert nicht nur mit elektromagnetischen Wellen, sondern ebenso bei akustischen Signalen, etwa dem Tatütata des Feuerwehrautos oder Ultraschalluntersuchungen in der Medizin.

Christian Dopplers Formel hat unsere Zivilisation heute komplett durchdrungen. Seine Arbeit war für die Menschheit mindestens so wichtig wie Mozarts Musik – und hätte daher ruhig ein klein wenig mehr Anerkennung verdient.

ASTROPHYSIK

TABBYS STERN – EIN KURIOSES

Das auffällige Verhalten des Sterns KIC 8462852 gibt den Astronomen Rätsel auf. Seine unregelmäßig schwankende Leuchtkraft nährt sogar Spekulationen, dahinter stecke eine außerirdische Zivilisation.



Kimberly Cartier ist Doktorandin in Astronomie und Astrophysik mit Schwerpunkt Exoplaneten an der Pennsylvania State University. **Jason T. Wright** ist ebendort Assistenzprofessor für Astronomie und Astrophysik am Center for Exoplanets and Habitable Worlds.



► spektrum.de/artikel/1478213

► An einem sonnigen Herbsttag im Jahr 2014 besuchte Tabetha Boyajian unsere Astronomie-Abteilung an der Pennsylvania State University, um eine ungewöhnliche Entdeckung zu besprechen. Die frisch promovierte Forscherin an der Yale University in New Haven war in den Daten des Kepler-Weltraumteleskops der US-Weltraumbehörde NASA auf einen Stern mit unerklärlichen Lichtschwankungen gestoßen. Diese verliefen völlig anders als die periodischen Helligkeitsänderungen, die ein zwischen Stern und Teleskop vorbeiziehender Planet hervorrufen würde; auch Apparatfehler und andere Ursachen hatte die junge Astronomin bereits ausschließen können.

Gemeinsam begannen wir zu spekulieren, und einer von uns (Wright) kam auf eine unorthodoxe Idee: Vielleicht wird das Phänomen gar nicht durch natürliche Prozesse verursacht, sondern von einer außerirdischen Technologie. In den 1960er Jahren hatte der Physiker Freeman Dyson postuliert, fortgeschrittene Zivilisationen würden ihren Energiehunger stillen, indem sie ihren Heimatstern allmählich komplett mit Sonnenkollektoren umhüllen. Diese – später Dyson-Sphäre genannte – Hohlkugel würde praktisch das gesamte Licht des Zentralgestirns schlucken. Konnte auch das Flackern von Tabetha Boyajians Stern eine künstliche Ursache haben? Die Idee war zwar weit hergeholt, aber vorläufig nicht völlig ausgeschlossen.

NASA / JPL-CALTECH



HIMMELSOBJEKT

NASA/JPL-CALTECH

Kometen und andere Himmelskörper können einen Stern kurzzeitig verdunkeln, wie in dieser künstlerischen Darstellung. Doch im Fall von Tabbys Stern müssen die Vorgänge anders sein als alles, was Astronomen bislang beobachtet haben.



Seither beschäftigt Boyajians Stern oder Tabbys Stern, wie er salopp genannt wird, die Fantasie von Astronomen und Sciencefiction-Fans. Wie bei allen großen Rätseln haben Physiker rasch zahlreiche kreative Lösungsvorschläge entwickelt, die aber alle nicht wirklich befriedigen können. Vielleicht sprengt das Phänomen tatsächlich den Rahmen der konventionellen Astronomie.

Eine überraschende Entdeckung in den Kepler-Daten

Nach seinem Start im Jahr 2009 beobachtete das Kepler-Teleskop vier Jahre lang einen kleinen Ausschnitt der Milchstraße. Planetenjäger suchten so genannte Transits, bei denen die Bahnebene eines fernen Planeten relativ zur Erde so günstig liegt, dass der Trabant regelmäßig vor seinem Zentralgestirn vorbeizieht und einen Teil von dessen Licht blockiert. Das Zeitdiagramm der Helligkeitsschwankungen, die so genannte Lichtkurve, zeigt bei jedem Planetentransit eine typische u-förmige Senke, die periodisch wiederkehrt. Breite, Tiefe und Abstand der Helligkeitseinbrüche geben Auskunft über Eigenschaften des Planeten wie Größe und Temperatur.

Von den mehr als 150 000 Sternen, welche die Kepler-Sonde katalogisiert hat, zeigt ein einziger eine völlig unerklärliche Lichtkurve. Zuerst fiel das Phänomen Hobby-Planetenjägern auf; sie durchforsteten im Rahmen des Planet Hunters Project der Yale University die Kepler-Daten nach Transits, die den automatischen Suchalgorithmen der professionellen Astronomen entgangen waren. Der nach seiner Katalognummer KIC 8462852 genannte Stern wies scheinbar regellose Lichteinbrüche auf; manche dauerten wenige Stunden, andere Tage oder Wochen. Gelegentlich trübte sich die Sternstrahlung um rund ein Prozent, was dem Transit eines der größten Exoplaneten entsprochen hätte, doch dann wieder um bis zu 20 Prozent.

Kein vorstellbares Planetensystem kann eine derart extreme und unregelmäßige Lichtkurve hervorrufen. Die verblüfften Laienastronomen informierten Boyajian, die

dem Aufsichtsteam des Planetenjägerprogramms angehörte. 2016 präsentierten sie das geheimnisvolle Himmelsobjekt der Öffentlichkeit in einer astronomischen Fachzeitschrift.

Tabbys Stern hielt noch mehr Überraschungen bereit. Nach Erscheinen von Boyajians Artikel durchstöberte Bradley Schaefer von der Louisiana State University in Baton Rouge die astronomischen Archive und behauptete, im Lauf des vergangenen Jahrhunderts sei die Helligkeit des Sterns um mehr als 15 Prozent gesunken. Der Befund war umstritten, denn eine derart starke Abschwächung über Jahrzehnte hinweg galt als fast unmöglich. Nach ihrer Entstehung strahlen Sterne Milliarden Jahre lang mit praktisch konstanter Helligkeit und neigen erst kurz vor ihrem Ende zu – für astronomische Verhältnisse – rapiden Veränderungen. Selbst diese dauern einige Millionen Jahre und werden von deutlichen Anzeichen begleitet, die bei Tabbys Stern fehlen.

Nach allen Messungen des Sternspektrums handelt es sich um einen durchschnittlichen Himmelskörper mittleren Alters. Nichts deutet auf einen veränderlichen Stern, der in regelmäßigem Takt pulsiert, oder darauf, dass er Material von einem Begleitstern einsammelt. Es gibt kein Anzeichen für ungewöhnliche magnetische Aktivität und keinen Grund, in ihm einen jungen Stern in seiner Entstehungsphase zu vermuten, also nichts, was rasche Helligkeitsänderungen erklären würde. Abgesehen von der abnormen Lichtkurve mutet Tabbys Stern ganz normal an.

Doch Schaefers Behauptung bestätigte sich, als die Astronomen Benjamin T. Montet und Joshua D. Simon sie anhand der ursprünglichen, weniger bekannten Kepler-Eichungsdaten überprüften. Wie sich herausstellte, hatte die Helligkeit des Sterns während der vier Jahre der Kepler-Mission um drei Prozent abgenommen. Dieser Effekt ist ebenso ungewöhnlich wie die kurzfristigen Sprünge der Lichtkurve.

Somit müssen wir gleich zwei verwirrende Erscheinungen erklären: eine langsame Verdunkelung über mindestens vier Jahre und möglicherweise das vergangene Jahrhundert hinweg sowie tiefe, unregelmäßige Senken, die Tage oder Wochen andauern. Zwar würden Astronomen eine einzige Erklärung für beide Phänomene vorziehen, aber jedes ist schon für sich genommen schwer genug zu verstehen. Folgende Szenarien wurden am häufigsten zur Begründung des bizarren Verhaltens von Tabbys Stern vorgeschlagen.

EINE SCHEIBE AUS STAUB UND GAS. Irreguläre Senken und eine langfristige Trübung treten bei sehr jungen Sternen mit eben erst entstehenden Planeten auf. Solche Exemplare sind von einer rotierenden Gas- und Staubscheibe umgeben, die vom Zentralgestirn erwärmt wird und Klumpen, Ringe und Verzerrungen bildet, aus denen später einmal Planeten hervorgehen. Von der Seite betrachtet können diese Unregelmäßigkeiten kurz das Sternlicht abschwächen, und taumelnde zirkumstellare Scheiben blockieren mitunter über Jahrzehnte und Jahrhunderte hinweg einen wachsenden Strahlungsanteil.

Tabbys Stern hingegen ist mittleren Alters und wird anscheinend nicht von einer Scheibe umgeben. Denn diese müsste, da sie erwärmt würde, zusätzliche Infrarot-

AUF EINEN BLICK PERPLEXE PLANETENJÄGER

- 1 Das Kepler-Weltraumteleskop sollte Planeten um ferne Sterne aufspüren. Bei der Datenauswertung fiel das abnorme Verhalten eines mehr als 1000 Lichtjahre entfernten Himmelsobjekts auf.
- 2 Der Stern KIC 8462852, nach seiner Entdeckerin auch Tabbys Stern genannt, zeigt eine scheinbar chaotische Abfolge von kurzen und längeren Helligkeitsveränderungen.
- 3 Für das einzigartige Phänomen haben Astronomen bisher keine überzeugende Erklärung gefunden. Einige diskutieren sogar die Theorie, eine Zivilisation lasse riesige Strahlungskollektoren um den Stern kreisen.

strahlung abgeben, und dafür gibt es kein Anzeichen. Möglicherweise bilden Staub und Gas nur einen derart dünnen und weiten Ring, dass er zwar Licht absorbiert, aber kaum zusätzliche Wärmestrahlung erzeugt. Allerdings hat noch niemand solche Ringe bei einem Stern mittleren Alters beobachtet. Da das Szenario auf einem nie gesehenen Phänomen beruht, halten wir es für sehr unwahrscheinlich.

EIN KOMETENSCHWARM. Ursprünglich nahm Boyajian an, vorbeiziehende Schwärme riesiger Kometen verursachen die seltsame Trübung. Tatsächlich verbringen Kometen die meiste Zeit weit von ihrem Stern entfernt und bewegen sich auf höchst exzentrischen Bahnen; das könnte die unregelmäßige Helligkeitsabnahme erklären. Doch auch hier stört die fehlende Wärme. Kometen müssten sich bei Annäherung an Tabbys Stern unweigerlich aufheizen und mit wachsender Entfernung rasch wieder abkühlen. Jede zusätzliche Infrarotstrahlung würde demnach nur während einer Senke in der Lichtkurve auftreten. Gegenwärtig beobachten wir nichts dergleichen, aber das könnte daran liegen, dass die Kometen, die vor einigen Jahren Lichtsenken verursachten, sich jetzt weit entfernt vom Stern aufhalten und daher keine nachweisbare Wärme abgeben. Dennoch müsste der Kometenschwarm, um außerdem die mysteriöse langfristige Trübung hervorzurufen, sehr groß sein und unweigerlich Wärmestrahlung aussenden.

Unser Schluss lautet also: Kometen wären eine plausible Erklärung für die kurzen Senken, aber nicht für die langsame Abschwächung. Wenn sie Letztere nicht verursachen, sind sie wahrscheinlich auch nicht der Grund für Erstere.

EINE WOLKE IM INTERSTELLAREN MEDIUM ODER IM SONNENSYSTEM. Auch im Raum zwischen den Sternen trüben Gas und Staub das Sternenlicht. Vielleicht absorbiert eine dichtere Wolke oder Schicht interstellaren Materials einen wechselnden Lichtanteil, während die Sichtlinie des Kepler-Teleskops auf seiner Wanderschaft um die Sonne verschiedene Teile der Wolke durchdringt. Die Dichte des interstellaren Materials könnte großräumig just so variieren, dass sie Tabbys Stern über längere Zeit hinweg allmählich verdunkelt, während lokale Verdichtungen zugleich die extrem kurzen Senken verursachen.

Für diese Hypothese sprechen Arbeiten von Valeri Makarov vom US Naval Observatory in Washington und seinem Kollegen Alexey Goldin. Ihnen zufolge sind einige kleinere Helligkeitssenken gar nicht Tabbys Stern selbst zuzuordnen; vielmehr handelt es sich um tiefe Senken von schwächeren Sternen, die fast genau in derselben Sichtlinie der Kepler-Sonde liegen. Dafür sind möglicherweise Schwärme kleiner, dichter Wolken oder Kometen im interstellaren Raum verantwortlich. Wir halten diese Hypothese für plausibel.

Eine verwandte Annahme platziert die Licht absorbierende Wolke an den Rand unseres eigenen Sonnensystems. In diesem Fall müsste die Sichtlinie des Kepler-Teleskops sie einmal pro Jahr durchqueren, doch wir beobachten in der Lichtkurve von Tabbys Stern keine jährliche Wiederholung der Senken. Außerdem gibt es derzeit

ANDY B. / GETTY IMAGES / ISTOCK

Wenn sich Tabbys Stern – hier eine Illustration – in einer Art Phasenübergang zwischen zwei Zuständen befindet, könnte das sein Flackern erklären.



keinerlei Hinweis auf die Existenz einer solchen Wolke. Zwar könnte man sich Eis- und Dampfschwaden vorstellen, die von Geysiren eines weit jenseits von Pluto um die Sonne kreisenden Planetoiden stammen; solange es dafür kein Indiz gibt, stufen wir die Hypothese gleichwohl als vorstellbar, aber unwahrscheinlich ein.

SCHWANKUNGEN DER STELLAREN LEUCHTKRAFT.

Sterne verändern ihre Helligkeit, wenn der Brennstoffvorrat in ihrem Kern zur Neige geht. Doch das dauert nicht Jahrhunderte oder Tage, sondern Jahrtausende, und es findet nicht in der Mitte des stellaren Lebenszyklus statt, sondern erst an seinem Ende. Sternflecken und Flares – kurze Strahlungseruptionen –, wie sie oft bei unserer Sonne auftreten, verändern hingegen die stellare Helligkeit viel kurzfristiger. Lässt sich die irreguläre Lichtkurve von Tabbys Stern durch physikalische Vorgänge in seinem Inneren erklären?

2016 hat ein Team um Mohammed Sheikh an der University of Illinois in Urbana-Champaign die Abfolge, Tiefe und Dauer der kurzzeitigen Senken statistisch analysiert und festgestellt, dass sie nach einem Potenzgesetz verteilt sind. Das ist für einen kontinuierlichen Phasenübergang charakteristisch, zum Beispiel für die Ausrichtung von Magneten in einem äußeren Magnetfeld. Demnach könnte sich in Tabbys Stern gerade ein innerer Übergang vollziehen, etwa eine globale Umorientierung seines Magnetfelds.

Allerdings hat kein Stern dieses Typs je ein solches Verhalten gezeigt. Tabbys Stern ist zu heiß, um einen stellaren Dynamo auszubilden, der in kühleren Sternen wie unserer Sonne magnetische Effekte erzeugt. Vor allem könnten stellare Magnetfelder niemals die langfristige Helligkeitsabnahme verursachen.

Der Astronom Brian Metzger von der Columbia University in New York hat zusammen mit Kollegen von der University of California in Berkeley eine plausible Erklärung vorgeschlagen: Ein Planet oder ein Brauner Zwerg – ein Mitteleingang zwischen Planet und Stern – ist mit Tabbys Stern kollidiert. Der Zusammenstoß hätte die Helligkeit des Sterns vorübergehend erhöht, und die beobachtete langfristige Trübung würde bedeuten, dass sich seine Leuchtkraft langsam normalisiert. Dieses Szenario liefert freilich einst-

weilen noch keine Erklärung für die unregelmäßigen Senken oder für den exakten Verlauf der von Montet und Simon in den Kepler-Eichdaten aufgespürten Abschwächung.

Wir schließen daraus: Das Kollisionsszenario ist halbwegs schlüssig, während andere Erklärungen, die sich auf Leuchtkraftschwankungen des Sterns berufen, kaum in Frage kommen.

SCHWARZE LÖCHER. Gelegentlich wird spekuliert, ein Schwarzes Loch mit stellarer Masse kreise auf enger Bahn um Tabby's Stern und blockiere dessen Licht. Diese Hypothese versagt aus drei Gründen. Erstens würde das Schwarze Loch den Stern hin und her zerrén und ein auffälliges Zappeln erzeugen – aber danach hat Boyajians Team vergeblich gesucht. Zweitens sind stellare Schwarze Löcher viel kleiner als Sterne und würden nur einen unmerklichen Bruchteil der Sternstrahlung blockieren. Tatsächlich würde das intensive Schwerfeld des Lochs als Gravitationslinse wirken und die scheinbare Helligkeit des Sterns sogar vergrößern. Drittens schluckt ein Schwarzes Loch Gas und Staub und erwärmt das hineinstürzende Material so sehr, dass es in allen Wellenlängen hell strahlt. Alles in allem müsste ein zwischen uns und Tabby's Stern befindliches Schwarzes Loch die Helligkeit im Widerspruch zur Beobachtung erhöhen statt vermindern.

Was wäre hingegen mit einem fernen Schwarzen Loch, das zwischen uns und Tabby's Stern frei dahintreibt? Angenommen, das Loch würde seinerseits von einer großen Scheibe kalten Materials umkreist – vergleichbar mit den Saturnringen, aber größer als unser ganzes Sonnensystem –, und die Scheibe wäre außen fast durchsichtig und nach innen hin dichter. Eine solche Scheibe könnte die langfristige Trübung von Tabby's Stern verursachen, wenn unsere Sichtlinie sie im Lauf der vergangenen 100 Jahre von außen nach innen durchquert hätte. Für die irregulären Senken der Lichtkurve könnten Ringe, Lücken und andere Feinstrukturen der rotierenden Scheibe verantwortlich sein. Da das Schwarze Loch und seine hypothetische Scheibe selbst nicht leuchteten, wären sie Boyajians hochauflösenden Messungen entgangen.

Dieses Szenario mutet etwas weit hergeholt an, denn wir beobachten keine Schwarzen Löcher mit kalten, weiträumigen Scheiben. Theoretisch sind solche Gebilde das Nebenprodukt von Supernovae, die als stellare Schwarze Löcher enden. Außerdem ist es nicht ganz unwahrscheinlich, dass ein derartiges Schwarzes Loch zumindest einen der 150 000 Sterne passiert hat, die während der vierjährigen Kepler-Messungen erfasst wurden. Deshalb stufen wir das Szenario als durchaus erwägenswert ein.

EINE AUSSERIRDISCHE TECHNOLOGIE. Nachdem uns alle natürlichen Erklärungen für das seltsame Verhalten von Tabby's Stern nicht völlig überzeugen konnten, wollen wir nun die sensationellste Möglichkeit betrachten – ein künstliches Riesengebilde vom Typ der Dyson-Sphäre.

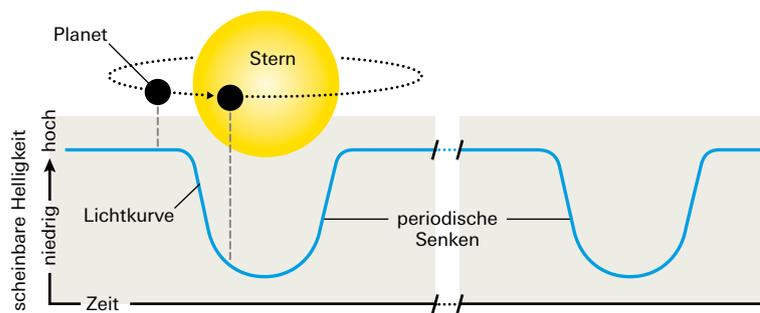
Hätte eine außerirdische Zivilisation zahlreiche Strahlungskollektoren unterschiedlicher Größe auf diverse Bahnen um den Stern gebracht, würde der Schwarm insgesamt einen Teil des Sternlichts blockieren und wie

Rätselhafte Strahlungsmuster

Für Astronomen ist es Routine, die Helligkeitsschwankungen eines Sterns zu deuten. Sternflecken, Planetentransits oder Gas- und Staubscheiben trüben das sonst stetige Licht reifer Sterne. Doch auf das Himmelsobjekt KIC 8462852, auch Tabby's Stern genannt, scheint keine dieser Erklärungen zuzutreffen.

Typische Lichtkurve

Ein vor seinem Stern vorbeiziehender Planet erzeugt eine charakteristische Senke in der so genannten Lichtkurve, dem zeitlichen Helligkeitsverlauf des Sterns. Diese Senke kehrt mit jedem Planetenumlauf regelmäßig wieder. Auch Sternflecken verursachen in der Lichtkurve ein periodisches Muster, das von der Rotationsgeschwindigkeit und dem Aktivitätszyklus des Sterns abhängt.



TIFANY FARRINGTON-GONZALEZ / SCIENTIFIC AMERICAN, MAI 2017

eine halb durchlässige Abschirmung wirken. Wenn dichtere Teile des Schwarms unsere Sichtlinie passieren, sehen wir Helligkeitsschwankungen, die Stunden oder Jahrhunderte andauern. Wie der Astronom Luc F. A. Arnold vor mehr als einem Jahrzehnt bemerkte, könnten besonders große oder Gruppen bildende Kollektoren vorübergehend den ganzen Stern abdecken und tiefe Senken verursachen.

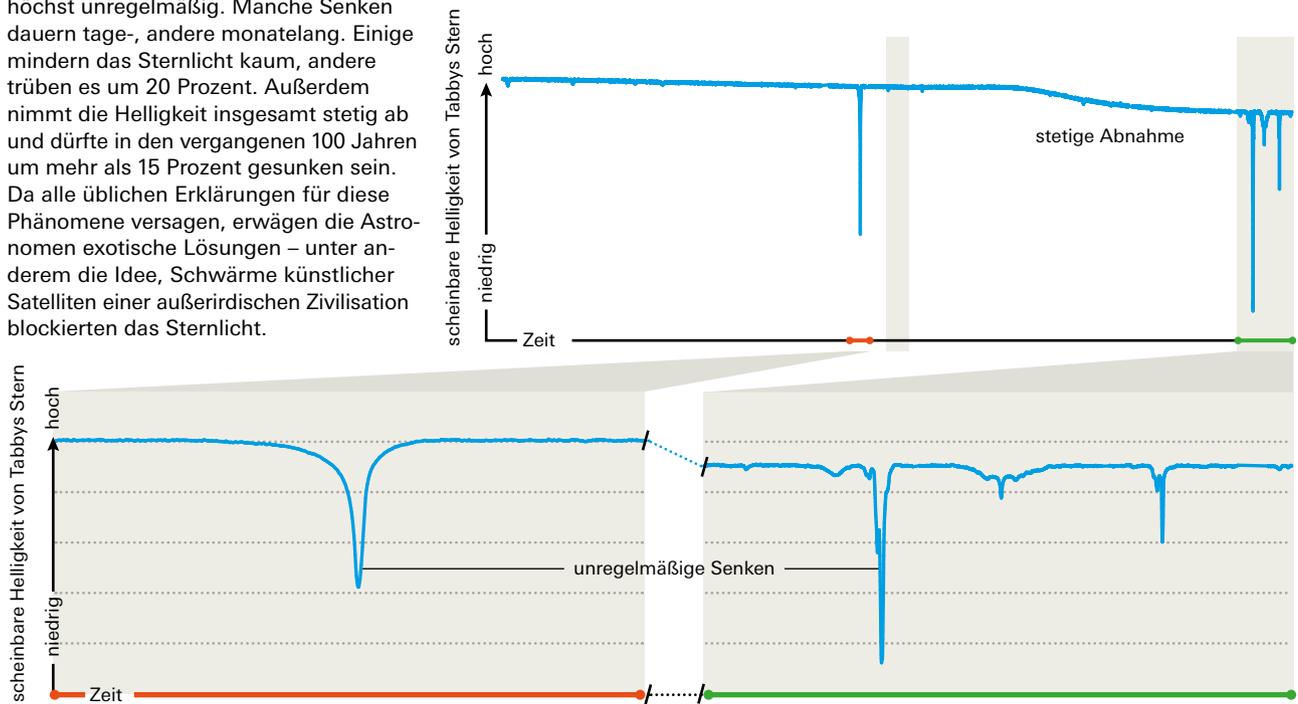
Hier ist das größte Problem ein ähnliches wie bei der Hypothese einer den Stern umkreisenden natürlichen Scheibe: Es fehlt die zusätzliche Infrarotstrahlung. Auch künstliche Megastrukturen gehorchen dem physikalischen Gesetz der Energieerhaltung. Die von ihnen aufgenommene Strahlungsenergie müssen sie schließlich als Wärme wieder abgeben. Je mehr Sternlicht die Außerirdischen sammeln, desto mehr Wärme müssen sie auch loswerden.

Um die Hypothese zu retten, kann man Verschiedenes annehmen: Der Kollektorenschwarm gibt die gesammelte Energie nicht als Wärme ab, sondern in Form von Radio- oder Laserstrahlung; er bildet keine Hohlkugel, sondern einen Ring, dessen Ebene genau in unserer Sichtlinie liegt; oder die Außerirdischen verwenden eine Technik, die unser physikalisches Verständnis übersteigt und überhaupt keine Wärme abstrahlt.

Wegen der vielen Unbekannten ist das Szenario der künstlichen Megastrukturen kaum zu überprüfen. Es kommt ernsthaft nur dann in Betracht, wenn sämtliche natürlichen Erklärungen ausgeschlossen werden – oder sobald wir offensichtlich künstliche Signale aus der Nachbar-

Abnormes Verhalten

Die Lichtkurve von Tabby's Stern variiert höchst unregelmäßig. Manche Senken dauern tage-, andere monatelang. Einige mindern das Sternlicht kaum, andere trüben es um 20 Prozent. Außerdem nimmt die Helligkeit insgesamt stetig ab und dürfte in den vergangenen 100 Jahren um mehr als 15 Prozent gesunken sein. Da alle üblichen Erklärungen für diese Phänomene versagen, erwägen die Astronomen exotische Lösungen – unter anderem die Idee, Schwärme künstlicher Satelliten einer außerirdischen Zivilisation blockierten das Sternlicht.



TIFFANY FARRANT-GONZALEZ, NACH MONTET, B.T. & SIMON, J.D.: KIC 8462852 FADED THROUGHOUT THE KEPLER MISSION. IN: ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS 830, L39, 2016, FIG. 4 / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2017

schaft von Tabby's Stern empfangen. Die Suche danach haben wir bereits begonnen, wobei Boyajian das Green-Bank-Observatorium in West Virginia benutzt. Bislang ist die Plausibilität der Hypothese unklar. Wir wissen einfach nicht genug, um die Wahrscheinlichkeit außerirdischer Aktionen auch nur grob abschätzen zu können.

Wir stehen vor neuen Überraschungen

Wir können jede Erklärung für das Verhalten von Tabby's Stern verwerfen, die ungewöhnliche Infrarotstrahlung erfordert, denn so etwas beobachten wir nicht. Das Gleiche gilt für Szenarien, die viele unwahrscheinliche Ereignisse, nie gesehene Objekte oder eine unbekannte Physik voraussetzen – zumindest so lange, bis alle Alternativen ausgeschlossen sind.

Derzeit suchen wir nach neuen Fakten. Als frisch ernannte Assistenzprofessorin an der Louisiana State University hat Boyajian das öffentliche Interesse an »ihrem« Stern für eine erfolgreiche Crowdfunding-Kampagne genutzt; mit der Schwarmfinanzierung konnten wir uns Zeit beim Las Cumbres Observatory Global Telescope Network kaufen. Mit dem weltumspannenden Teleskopnetz beobachten wir Tabby's Stern mehrmals am Tag, und sobald sein Licht auffällig abnimmt, stehen mehrere Teleskope bereit, um das Spektrum der Senke zu messen. Daraus können wir auf die Zusammensetzung des lichthemmenden Materials schließen.

Andere Astronomen suchen in den Archiven nach zusätzlichen Daten zum langfristigen Trübungsverlauf, um die

Vielfalt der Theorien über die auffällige Lichtkurve einzugrenzen. Außerdem erwarten wir von der Gaia-Mission der europäischen Weltraumorganisation ESO bald eine bessere Entfernungsmessung (siehe **Spektrum** Juni 2017, S. 20). Falls Tabby's Stern weniger als 1300 Lichtjahre von uns entfernt ist, reicht die Trübung durch Gas und Staub des interstellaren Mediums nicht aus, die Helligkeitsabnahme zu erklären. Beträgt der Abstand hingegen rund 1500 Lichtjahre, könnten zufällige Staubmuster entlang der Sichtlinie die langsame Trübung verursachen. Liegt der Stern aber noch viel weiter entfernt, müsste er deutlich leuchtkräftiger sein als bisher vermutet. Dann könnte die Helligkeitsabnahme, wie von Metzgers Team vermutet, die Rückkehr zur Normalität nach einer Verschmelzung bedeuten.

Bis die Beobachtungen mehr Informationen liefern, sind den Spekulationen nur durch unsere Fantasie und eine gesunde Dosis Physik Grenzen gesetzt. ◀

QUELLEN

Arnold, L. F. A.: Transit Light-Curve Signatures of Artificial Objects. In: *Astrophysical Journal* 627, S. 534–539, 2005

Boyajian, T. S. et al.: Planet Hunters IX, KIC 8462852: Where's the Flux? In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, S. 3988–4004, 2016

Montet, B. T., Simon, J. D.: KIC 8462852 Faded throughout the Kepler Mission. In: *Astrophysical Journal Letters* 830, L39, 2016

Sheikh, M. A. et al.: Avalanche Statistics Identify Intrinsic Stellar Processes Near Criticality in KIC 8462852. In: *Physical Review Letters* 117, 261101, 2016

SCHLICHTING! UMKRÄNZTES LICHTKREUZ IM QUADRAT



Scheiben mit Mehrfachverglasung verformen sich, wenn der Gasdruck in ihrem Inneren nicht dem äußeren Luftdruck entspricht. Die Fenster werden dabei zu Hohl- und Wölbspiegeln, wie Reflexionsmuster an sonnigen Tagen offenbaren.

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/1478215

► Eines der zugleich markantesten und dennoch wohl am wenigsten bekannten urbanen Lichtphänomene ist das Lichtkreuz im Lichtkreis. Hat man es erst einmal bemerkt, wundert man sich, dass es einem nicht schon früher aufgefallen ist. Es ist eigentlich kaum zu übersehen. An jedem klaren Tag, vor allem morgens und abends bei tief stehender Sonne, sind die Fronten mancher Häuserblocks geradezu übersät von diesen Erscheinungen – besonders dann, wenn die Straße in Nord-Süd-Richtung verläuft.

Im Internet findet man viele esoterische Deutungen, von göttlichen Zeichen bis hin zu UFO-Erscheinungen. In diesen Zusammenhang passt ein Zitat des Experimentalphysikers Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799): »Man spricht viel von Aufklärung, und wünscht mehr Licht. Mein Gott was hilft aber alles Licht, wenn die Leute entweder keine Augen haben, oder die, die sie haben, vorsätzlich verschließen.«

Zwar haben diejenigen, denen das Phänomen bislang nicht aufgefallen ist, ihre Augen wohl nicht bewusst vor ihm verschlossen. Doch zumindest unbewusst sind die Netzhäute der meisten Menschen schon von den seltenen Kreuzen belichtet worden. Denn, um zur Aufklärung zu kommen: Es handelt sich um spiegelnde Reflexionen der Sonne an überaus alltäglichen städtischen Objekten, nämlich an doppelt verglasten Fenstern. Leicht konkav und konvex gewölbte Scheiben projizieren das Bild an die gegenüberliegenden Hauswände oder auf die Straße. Die Reflexe bewegen sich sogar – ebenso wie die Sonne verschieben sie sich in etwa zwei Minuten um ihren eigenen Durchmesser.

Wieder kann eine rechteckige Scheibe Erscheinungen hervorrufen, deren Gestalt nichts Rechteckiges an sich hat? Die Ursache dafür liegt in einer hohl- und wölbspiegelartigen Verformung der Fenster, die so nur bei Mehrfachverglasung auftritt. Darum gibt es das Phänomen erst seit einigen Jahrzehnten, seit Isolierglas verbaut wird.

Bei dessen Herstellung werden zwei Scheiben durch einen Abstandhalter voneinander getrennt und luftdicht verklebt. Der Zwischenraum enthält entweder trockene Luft oder in moderneren Fabrikaten ein besser isolierendes Edelgas. Entscheidend für das vorliegende Phä-

nomen ist, dass der Gasdruck zwischen den Scheiben dem äußeren Luftdruck zum Zeitpunkt der Fertigstellung entspricht. Steht die Fabrik beispielsweise in München (518 Meter über

Noch viel wunderbarer als der einfache Spiegel ist der durchsichtige Spiegel, zum Beispiel ein Fenster, das auf eine Landschaft hinausgeht

Christian Morgenstern (1871–1914)

dem Meeresspiegel) und wird das Fenster im tiefer liegenden Münster (60 Meter über Meeresniveau) in ein Gebäude eingebaut, so wölben sich die beiden Scheiben auf Grund des hier höheren Außendrucks nach innen. Das Sonnenlicht trifft daher als Erstes auf eine konkav und danach auf eine konvex gekrümmte Scheibe. Der jeweils spiegelnd reflektierte Teil des Lichts wird folglich von der äußeren Scheibe fokussiert und von der inneren Scheibe defokussiert.

Sofern sich im passenden Abstand eine Projektionsfläche etwa in Form einer Hauswand oder einer Straße befindet, ruft die konkav gekrümmte Glasfläche darauf eine kreuzförmige Lichtfigur hervor, da sich rechteckig eingespannte Scheiben längs der beiden Diagonalen am stärksten verbiegen. Dieses Lichtkreuz überlagert sich



Lichtkreuze in Lichtkreisen, hier sowohl an einer Wand als auch auf dem Bürgersteig davor, entstehen durch Projektion des Sonnenlichts an den Fenstern gegenüberliegender Häuser.

mit einer Art Lichtkreis, der durch die Defokussierung an der konvexen Scheibe entsteht.

Bei umgekehrten Druckverhältnissen erscheinen die gleichen Bilder. Die Scheiben sind dann nach außen gewölbt und vertauschen ihre Rollen. Die Lichtfiguren sind deutlich zu erkennen, obwohl ein Fenster nur wenige Prozent des einfallenden Lichts reflektiert. Die Projektionswände liegen meist im Schatten, so dass genügend Kontrast vorhanden ist (siehe Fotos oben).

In jüngster Zeit werden wegen ihrer noch besseren Wärmedämmung immer mehr dreifach verglaste Fenster verbaut. Da liegt die Frage nahe: Hinterlässt die zusätzliche Scheibe einen sichtbaren Eindruck in den Reflexionsmustern? Bei Dreifachverglasung hat man es mit zwei luftdicht abgeschlossenen Kammern zu tun, die eine Scheibe voneinander trennt. Beide konservieren den Druck zum Zeitpunkt der Herstellung. Dreifachgläser dürften sich also in Gegenden mit unterschiedlichem Luftdruck ganz ähnlich verbiegen – zumindest die äußeren Scheiben. Die innere sollte flach bleiben. Denn die Kräfte durch die beiden Zwischenräume auf die mittlere Scheibe sind sowohl bei Unter- als auch bei Überdruck gegenläufig und gleich groß, heben sich also stets auf.

Das müsste auch bei den Lichtkreuzen zu sehen sein. Zusätzlich zum Kreuz und zum Kreis erwarten wir ein Rechteck, das der mittleren Scheibe entspricht. Bei aufmerksamer Beobachtung solcher Projektionen erkennt man, dass es tatsächlich so ist (siehe Foto rechts unten).

Wer die Lichtkreuze einmal gesehen hat, bemerkt sie immer wieder und wird dabei erkennen: Nicht jedes Mal ergibt sich ein Kreuz in einem Kreis. Die Abweichungen sind oft groß und reichen von bloßer Unschärfe bis zu Figuren, die nichts mehr mit einem Kreuz gemein haben. Ein perfektes Bild entsteht nur dann, wenn der Abstand

Um die Lichtkreuze sehen zu können, ist eine beschattete Fläche nötig – und sei es nur der Schatten eines Autos.



Ein zusätzliches helles Rechteck lässt auf dreifach verglaste Fenster schließen.



der Projektionswand genau zur Brennweite durch die Krümmung passt und die Scheiben nicht zusätzlich unter Spannung stehen. Würde man die Reflexionen derselben Fensterfront an verschiedenen Tagen zu ähnlichen Zeiten beobachten, könnte man sogar Luftdruckunterschiede erkennen. Praktischen Nutzen hätte ein solches Barometer aber kaum – es wäre schließlich nur bei Sonnenschein abzulesen.

LITERATURTIPP

Schlichting, H. J.: Lichtkreuze in Lichtkreisen. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 57/8, S. 464–474, 2004

Details zur Berechnung und Modellierung der Reflexionen

MATHEMATIK DIE SELTSAMEN ZAHLEN DER TEILCHENKOLLISIONEN

Zwischen Experimenten der Hochenergiephysik und höchst abstrakten Kenngrößen algebraischer Kurven und Flächen tut sich eine unerwartete Verbindung auf.



Kevin Hartnett ist Wissenschaftsjournalist in Columbia (South Carolina).

» spektrum.de/artikel/1478219

Am Large Hadron Collider in Genf schießen Physiker Protonen auf einen 27 Kilometer langen Rundkurs und lassen sie dann mit fast Lichtgeschwindigkeit aufeinanderprallen. Nur mit großer technischer Raffinesse lassen sich die Elementarteilchenstrahlen so präzise lenken, dass tatsächlich einige Frontaltreffer zu Stande kommen. In merkwürdigem Gegensatz zu dem hohen experimentellen Aufwand steht das primitive Hilfsmittel, mit dem die Wissenschaftler die Trümmer theoretisch be-

schreiben: Feynman-Diagramme. Eine Kinderzeichnung von einem Zusammenstoß würde auf den ersten Blick nicht wesentlich anders aussehen.

Der amerikanische Physiker Richard Feynman (1918–1988, Nobelpreis 1965; siehe auch den Beitrag von Michael Esfeld auf S. 12) hatte die Diagramme, die heute seinen Namen tragen, in den 1940er Jahren entworfen. Sie bestehen aus Linien, die sich in einem Punkt treffen, und anderen, die von einem solchen Knoten ausgehen (siehe »Berechnung von Teilchenkollisionen«, S. 68). Eine Linie ist der Weg eines Elementarteilchens in einem Raum-Zeit-Diagramm, ein Knoten kennzeichnet eine Kollision und die von ihm wegführenden Linien den Weg der Kollisionsprodukte. Die fliegen entweder weg oder enden in neuen Knoten, wenn sie zum Beispiel zerfallen oder ein Photon abstrahlen oder aufnehmen. Eine Abfolge von Knoten kann beliebig lang werden – soweit die Fantasie der Physiker reicht.

Dieses Schema ergänzen die Physiker durch Zahlen und andere Größen, die Massen, Impulse und Flugrichtung der beteiligten Teilchen angeben. Dann erstellen sie eine Art Bilanz des gesamten Vorgangs, was diverse Rechenoperationen, darunter auch Integrationen, erfordert. Am Ende steht eine einzige Zahl, die so genannte Feynman-Amplitude. Sie gibt an, wie groß die Chance ist, dass die Teilchenkollision genau so verläuft, wie das Diagramm sie darstellt.

»In gewisser Weise erfand Feynman diese Diagramme, um bei den umfangreichen Berechnungen den Überblick zu behalten«, sagt Sergei Gukov, ein theoretischer Physiker vom California Institute of Technology in Pasadena.

AUF EINEN BLICK PERIODEN UND MOTIVE

- 1 Berechnet man theoretisch die Wahrscheinlichkeit, mit der sich eine Reaktion von Elementarteilchen ereignet, so ergeben sich Zahlen (»Feynman-Amplituden«), die einer speziellen Klasse angehören.
- 2 Genau diese Klasse tritt auch im Rahmen der algebraischen Geometrie auf, eines Teilgebiets der Mathematik, das abstrakte Aussagen über die Menge der Lösungen algebraischer Gleichungen macht.
- 3 Physiker wie Mathematiker versuchen nun, diese überraschende und zunächst abwegig wirkende Verbindung zwischen ihren beiden Gebieten für weitere Erkenntnisse zu nutzen.



Zwischen Teilchenkollisionen und mathematischen »Motiven« besteht offenbar eine noch nicht verstandene Verbindung.

XIADLIN ZENG FÜR QUANTA MAGAZINE

Feynman-Diagramme haben den Physikern über viele Jahre sehr gute Dienste geleistet. Nun aber stößt ihre Anwendung immer häufiger an Grenzen. Eine davon ist der zunehmende Rechenaufwand. Physiker untersuchen Teilchenkollisionen mit immer höheren Energien. Dadurch wachsen die Anforderungen an die Genauigkeit der beteiligten Messungen erheblich und mit ihr die Anzahl und Komplexität der Feynman-Diagramme, die man in die Rechnung einbeziehen muss.

Die zweite Grenze ist grundsätzlicherer Natur. Im Prinzip gibt es unendlich viele Möglichkeiten, wie sich eine Teilchenkollision im Detail abgespielt haben könnte – mit irgendwelchen Zwischenprodukten, die schon wieder zerfallen sind oder miteinander reagiert haben, bevor sie sich nach außen bemerkbar machen. Aber, so die Annahme, je komplizierter ein solcher Prozess, desto unwahrscheinlicher ist er auch, so dass man ab einer gewissen Komplexität mit Rechnen aufhören kann, weil alle übrigen Prozesse nur noch eine verschwindend geringe Wahrscheinlichkeit zum Gesamtergebnis beitragen. Das zugehörige Verfahren, die »Störungsrechnung«, funktioniert gut bei Zusammenstößen von Elektronen, denn dabei wirken nur die schwache und die elektromagnetische Kraft. Für energiereichere Kollisionen jedoch, etwa die von Protonen, bei denen die starke Kernkraft die dominierende Rolle spielt, liefert die Störungsrechnung keine ausreichend guten Ergebnisse mehr oder führt sogar in die Irre.

»Wir wissen genau, dass die Ergebnisse der Berechnung ab einem gewissen Punkt divergieren«, sagt Francis Brown, ein Mathematiker von der University of Oxford.

Das heißt, die Feynman-Amplituden werden nicht kleiner, sondern wieder größer, nachdem ihre Summe der Realität schon nahegekommen war. »Allerdings ist nicht klar, wann genau man aufhören sollte.«

Vielleicht gibt es jetzt aber Anlass zum Optimismus. Seit zehn Jahren untersuchen Physiker und Mathematiker eine überraschende Beziehung, die möglicherweise den ehrenwerten Feynman-Diagrammen zu neuem Leben und der Physik wie der Mathematik zu weit reichenden neuen Einsichten verhelfen wird. Die mit Hilfe von Feynman-Diagrammen berechneten Werte stimmen genau mit einigen der wichtigsten Zahlen überein, die in der algebraischen Geometrie vorkommen, einem Zweig der reinen Mathematik. Diese Größen heißen »Perioden von Motiven«. Ein solches Zusammentreffen erscheint zunächst völlig abstrus, ungefähr so, als ob man die Reiskörner in Tassen verschiedener Größe zählen und dabei jedes Mal eine Primzahl vorfinden würde. Ein Grund dafür will einem nicht in den Sinn kommen.

Dennoch: »Es besteht eine Beziehung zwischen der Natur und der algebraischen Geometrie mit ihren Perioden, und inzwischen wissen wir, dass es sich nicht um ein zufälliges Zusammentreffen handelt«, sagt Dirk Kreimer, ein Physiker von der Humboldt-Universität Berlin.

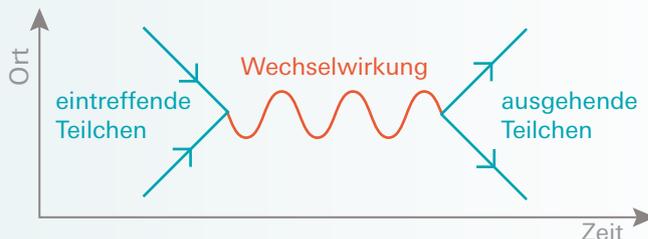
Mittlerweile arbeiten Mathematiker und Physiker gemeinsam intensiv daran, die genaue Art dieser Beziehung zu entschlüsseln. Die Physik hat die Aufmerksamkeit der Mathematiker auf eine spezielle Klasse von Zahlen gelenkt, die sie besser verstehen möchten: Verbirgt sich eine Struktur hinter denjenigen Perioden, die in der Physik

Berechnung von Teilchenkollisionen

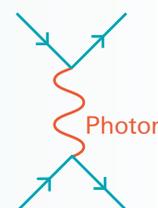
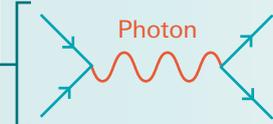
Vor jedem Experiment, zum Beispiel am Large Hadron Collider, errechnen die Kernphysiker eine Prognose darüber, was sich bei einer Teilchenkollision ereignen wird. Das wesentliche Mittel dafür ebenso wie für die Interpretation der Messergebnisse, ist das Feynman-Diagramm.

Der lange Weg zur Prognose

1 In der Quantenmechanik werden Teilchenkollisionen durch Feynman-Diagramme dargestellt. Ein solches Diagramm zeigt den Ausgangszustand (die eintreffenden Teilchen) und den Endzustand (die Reaktionsprodukte) sowie alle Kollisionen, die dazwischen noch stattfinden, aber nicht direkt beobachtbar sind.



2 Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit für einen bestimmten Ausgang des Experiments müsste man eigentlich alle denkbaren Verläufe der Kollision berechnen, zumindest die wichtigsten. Hier sind vier von tausenden möglichen Detailverläufen dargestellt.



Integral A

Integral B

Integral C

Integral D

3 Für jedes Diagramm berechnen die Physiker ein zugehöriges »Feynman-Integral«, das die Massen, Impulse und Bewegungsrichtungen der Teilchen einbezieht.

4 Um die Wahrscheinlichkeit für das Gesamt ereignis zu berechnen, addieren die Physiker die (komplexen) Feynman-Integrale aller Diagramme (die »Amplituden«) und quadrieren den Betrag dieser Summe.

$$\left| A + B + C + D \right|^2 = \text{Wahrscheinlichkeit}$$



Amplitude

Eine mögliche Abkürzung

Die für Feynman-Diagramme berechneten Amplituden gehören alle zu einer gewissen Sorte von Zahlen, den so genannten Perioden.

Perioden spielen in der Mathematik eine wichtige Rolle, weil sie charakteristische Größen grundlegender mathematischer Objekte sind – der »Motive«. Diese wiederum dienen zur Untersuchung von Lösungsmengen polynomialer Gleichungen. Unter den Perioden solcher Motive finden sich Werte der riemannschen Zetafunktion.

Die Mathematiker untersuchen Struktur und Eigenschaften der Menge aller Perioden. Sollten Physiker vergleichbare Strukturen bei Amplituden von Feynman-Diagrammen entdecken, würde das den Berechnungen für ihre Experimente massiv aufhelfen.

$$\zeta(s) = \frac{1}{1^s} + \frac{1}{2^s} + \frac{1}{3^s} + \frac{1}{4^s} + \frac{1}{5^s} \dots$$

$$\zeta(2) = \frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{4^2} + \frac{1}{5^2} \dots = \frac{\pi^2}{6}$$

$$\zeta(4) = \frac{1}{1^4} + \frac{1}{2^4} + \frac{1}{3^4} + \frac{1}{4^4} + \frac{1}{5^4} \dots = \frac{\pi^4}{90}$$

$$\zeta(6) = \frac{1}{1^6} + \frac{1}{2^6} + \frac{1}{3^6} + \frac{1}{4^6} + \frac{1}{5^6} \dots = \frac{\pi^6}{945}$$

auftauchen? Welche speziellen Eigenschaften könnte diese Klasse von Zahlen haben? Die Physiker wiederum versprechen sich von einem tieferen mathematischen Verständnis eine größere Klarheit über die Ereignisse in der chaotischen Welt der Quanten.

Motive: Wiederkehrende Themen in Musik und algebraischer Geometrie

Heute gehören Perioden zu den abstraktesten Gegenständen der Mathematik. Anfangs dienten sie jedoch einem konkreten Anliegen. Zu Beginn des 17. Jahrhunderts bemühten sich Wissenschaftler wie Galileo Galilei, die Zeit zu berechnen, die ein Pendel für eine komplette Schwingung benötigt. Sie erkannten, dass man dafür das Integral – eine Art unendliche Summe – zu einer gewissen Funktion finden musste. In diese Funktion gehen Daten wie die Länge des Pendels und seine Anfangsauslenkung ein. Ungefähr zur gleichen Zeit stellte Johannes Kepler ähnliche Berechnungen an, um die Umlaufzeit eines Planeten um die Sonne zu bestimmen. Die Forscher bezeichneten diese Werte, wenig überraschend, als »Perioden«.

Im Verlauf des 18. und 19. Jahrhunderts studierten die Mathematiker allgemeinere Perioden – nicht nur im Zusammenhang mit Pendeln oder Planetenbahnen, sondern als Zahlen, die sich beim Integrieren polynomialer Funktionen wie $x^2 + 2x - 6$ oder $3x^3 - 4x^2 - 2x + 6$ ergeben. Mehr als ein Jahrhundert lang erkundeten Koryphäen wie Carl Friedrich Gauß und Leonhard Euler das Universum der Perioden und entdeckten dabei zahlreiche Hinweise auf eine ihm zu Grunde liegende Ordnung. Unter anderem aus diesen Bemühungen ging im 20. Jahrhundert die algebraische Geometrie hervor, die sich mit der Gestalt der Lösungsmengen polynomialer Gleichungen befasst.

In den 1960er Jahren nahm das Gebiet einen gewaltigen Aufschwung. Die Mathematiker taten genau das, was in ihrem Gebiet häufig zum Erfolg führt: Sie übersetzten einigermaßen konkrete Objekte wie Gleichungen in abstraktere, um mit deren Hilfe Beziehungen zu finden, die an den Ursprungsobjekten alles andere als offensichtlich waren.

In diesem Fall betrachteten sie statt der ursprünglichen Gegenstände, Polynome in mehreren Variablen, geometrische Strukturen, so genannte algebraische Varietäten, die als Mengen der Nullstellen solcher Polynome definiert sind. Um wesentliche Eigenschaften dieser geometrischen Objekte zu finden, insbesondere solche, die unabhängig von dem die Varietät definierenden Polynom sind, entwickelten sie neue Methoden, »Kohomologien« genannt.

Etwa um 1960 hatte der Ansatz so viele Blüten getrieben, dass die Situation unüberschaubar wurde: Es gab singuläre Kohomologie, de Rham-Kohomologie, »étale Kohomologie« und andere. Fast schien es, als hätte jeder algebraische Geometer seine eigene Sichtweise auf den Gegenstand seiner Wissenschaft. Dann kam der geniale Alexander Grothendieck (1928–2014; **Spektrum** Juli 2015, S. 52) und zeigte, dass alle diese diversen Kohomologietheorien nur verschiedene Versionen derselben Sache sind.

Dieses Gemeinsame nannte Grothendieck ein »Motiv«. »In der Musik versteht man darunter ein wiederkehrendes Thema. Für Grothendieck war ein Motiv etwas, das in

verschiedener Gestalt immer und immer wieder auftaucht, dabei aber stets dasselbe bleibt«, sagt Pierre Cartier, ein Mathematiker am Institut des Hautes Études Scientifiques bei Paris und früherer Kollege von Grothendieck.

Motive sind in gewisser Weise die elementaren Bausteine der Lösungsmengen polynomialer Gleichungen, etwa so wie jede natürliche Zahl ein Produkt von Primfaktoren ist oder jeder chemische Stoff aus Atomen verschiedener Elemente besteht. Und ebenso wie jedes Element Kenngrößen wie Ordnungszahl und Atomgewicht hat, ordnen Mathematiker einem Motiv gewisse Zahlen zu. Die wichtigsten unter ihnen sind seine Perioden. Wenn zwei Motive, die verschiedenen algebraischen Varietäten entstammen, die gleichen Perioden haben, müssen sie bereits im Wesentlichen gleich sein.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



CLAUDIA MARCELLONI UND MAXIMILIEN BRICE, CERN

»Sind die Perioden, also spezifische Zahlen, bekannt, dann ist das ungefähr so, als ob man das Motiv selbst kennt«, sagt Minhyong Kim, ein Mathematiker an der Oxford University.

Um zu verstehen, wie ein und dieselbe Periode unerwartet in verschiedenen Kontexten auftauchen kann, denke man an die Kreiszahl π , in den Worten von Cartier »das berühmteste Beispiel einer Periode«. In der Tat erscheint π in zahlreichen Kontexten: bei der Formel für den Kreisumfang, für die Kreisfläche und für das Kugelvolumen, was auf Integrale in einer, zwei beziehungsweise drei Dimensionen hinausläuft. Dass ein und dieselbe Zahl in derart unterschiedlichen Situationen auftaucht, war für die Gelehrten der Antike ein großes Mysterium. »Die moderne Erklärung besteht in der Erkenntnis, dass alle drei Gebilde dasselbe Motiv haben und damit im Wesentlichen auch dieselbe Periode«, so der Oxforder Mathematiker Brown.

Feynmans Pfadintegrale:

Der beschwerliche Weg zur Erleuchtung

Ging es bei der Periode π noch um einigermaßen verwandte Gebilde wie Kreis und Kugel, wollen Mathematiker und Physiker heute wissen, warum diese Zahlen im Zusammenhang mit geometrischen Objekten völlig anderer Art auftauchen: den Feynman-Diagrammen.

Nun, selbst diese kinderzeichnungsartigen Dinge haben geometrische Eigenschaften. Sie bestehen aus Linien, Pfeilen und Knoten. Nehmen wir ein einfaches Beispiel: Ein Elektron und ein Positron stoßen zusammen und zerfallen in ein Myon und ein Antimyon. Möchte man die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der genau dieses Paar entsteht, müsste man Masse und Impuls jedes der eintreffen-

den Teilchen kennen und dazu noch etwas über ihre Bahnen wissen. Aber quantenmechanisch ist eine Bahn nicht genau bestimmt, weil Ort und Impuls eines Teilchens nie zugleich genau bekannt sein können. Also muss man nicht nur die Bahn betrachten, der die Teilchen nach der klassischen Physik folgen würden, sondern auch benachbarte Wege. Über alle diese Wege muss man eine Art Mittelwert bilden. Der ist das so genannte Feynman-Integral.

Jeder mögliche Verlauf, den ein Zusammenstoß bestimmter Teilchen nehmen könnte, lässt sich in einem Feynman-Diagramm darstellen, und jedes Diagramm bestimmt ein eigenes Integral. Möchte man die Wahrscheinlichkeit ausrechnen, mit der sich bei gegebener Ausgangssituation ein konkreter Endzustand ergibt, betrachtet man alle dabei möglichen Diagramme, berechnet jedes der zugehörigen Integrale und addiert alle so gebildeten Werte. Das Ergebnis heißt »Wahrscheinlichkeitsamplitude«. Der Betrag dieser (komplexen) Zahl zum Quadrat ist die gesuchte Wahrscheinlichkeit (siehe »Berechnung von Teilchenkollisionen«, S. 68).

Wenn das Ereignis tatsächlich so abläuft wie oben beschrieben, ist das alles noch relativ einfach. Interessant wird es, wenn ein Feynman-Diagramm Schleifen enthält. Dem entspricht eine Situation, in der ein beteiligtes Teil-

Da die Perioden aus der Physik stammen, geht ihre Bedeutung über das zweckfreie Glasperlen-spiel hinaus

chen ein weiteres emittiert und dann wieder absorbiert. Wenn ein Elektron mit einem Positron kollidiert, gibt es eine unendliche Vielfalt solcher Erzeugungs- und Zerfallsprozesse, bevor am Ende das Myon und das Antimyon davonfliegen. Bei diesen Zwischenereignissen werden neue Teilchen, etwa Photonen, erzeugt und gleich wieder vernichtet, ohne dass sie zu beobachten sind. Die ein- und ausgehenden Teilchen sind dieselben wie eben beschrieben, aber die unbeobachtbaren Erzeugungs- und Vernichtungsprozesse können einen, wenn auch geringen, Einfluss auf den Ausgang haben.

»Es ist wie mit einem Baukasten aus Stäbchen und Klötzchen. Baut man ein Diagramm, dann kann man – nach den Regeln der Theorie – immer wieder neue Teile hinzufügen«, sagt Philip (»Flip«) Tanedo, ein Physiker an der University of California in Riverside. »Du fügst hier eine neue Linie ein und da einen weiteren Knoten, und mit jeder Ergänzung wird es komplizierter.«

Jede hinzugenommene Schleife macht die Berechnung etwas genauer. Allerdings erhöht sich mit zunehmender Anzahl der Schleifen die Zahl der zu berücksichtigenden Feynman-Diagramme dramatisch. Typische Zahlen: Für eine einzige Schleife braucht man nur ein Diagramm, für zwei Schleifen schon sieben und für drei Schleifen 72 Stück. Erhöht man die Anzahl auf fünf Schleifen, dann

wären in die Berechnung etwa 12 000 Integrale einzubeziehen – eine Rechnung, die Jahre dauern würde (siehe »Kombinatorische Explosion«, rechts).

Statt sich durch so viele mühsame Integrale zu ackern und am Ende nur eine einzige Zahl, die Gesamtamplitude, herauszubekommen, würden die Physiker es vorziehen, Einsichten über diese Zahl allein durch intensives Betrachten des Feynman-Graphen zu gewinnen, so wie die Mathematiker die Beziehung zwischen Perioden und Motiven ausnutzen.

Perioden, Motive und die riemannsche Zetafunktion

Der vermutete Zusammenhang zwischen Perioden und Amplituden erblickte das Licht der Welt 1994 in einem Vortrag, den Kreimer und sein Fachkollege David Broadhurst von der Open University in England hielten, sowie in einem Artikel ein Jahr später. Daraufhin spekulierten Mathematiker und Physiker, ob vielleicht alle Amplituden sogar Perioden gemischter Tate-Motive seien, einer speziellen Art von Motiven, die nach John Tate benannt sind, einem emeritierten Professor der Harvard University. Deren Perioden sind stets Vielfache von Werten der riemannschen Zetafunktion, einer der bedeutendsten Konstruktionen der Zahlentheorie (Spektrum **September 2008**, S. 86). In dem oben genannten Beispiel – Elektron und Positron zerfallen zu Myon und Antimyon – ergibt sich als Amplitude der Wert $6\zeta(3)$, das Sechsfache des Werts der Zetafunktion an der Stelle 3.

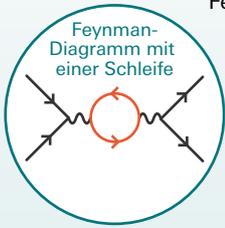
Wären tatsächlich alle Amplituden Vielfache von Werten der Zetafunktion, dann hätten es die Physiker mit einer bestens untersuchten Klasse von Zahlen zu tun. Im Jahr 2012 fanden allerdings Brown und sein Fachkollege Oliver Schnetz von der Universität Erlangen-Nürnberg heraus, dass dem nicht so ist. Bislang sind zwar alle Amplituden, mit denen die Physiker zu tun hatten, tatsächlich Perioden gemischter Tate-Motive. Aber »da draußen lauern wohl noch Monster, die uns einen Knüppel zwischen die Beine werfen«, sagt Brown. »Es sind zwar sicher auch Perioden, aber nicht die netten und einfachen, auf die wir gehofft hatten.«

Immerhin gibt es allem Anschein nach eine Beziehung zwischen der Anzahl von Schleifen in einem Feynman-Diagramm und einer Größe, welche die Mathematiker »Gewicht« nennen. Es handelt sich um eine Zahl, die mit der Dimension des Raums zusammenhängt, über den integriert wird: Ein Periodenintegral über eine Dimension, sprich über ein Intervall oder eine Gerade, kann das Gewicht 0, 1 oder 2 haben, eins über zwei Dimensionen ein Gewicht von bis zu 4, und so weiter. Die Perioden lassen sich auch nach ihrem Gewicht in verschiedene Typen einteilen: Alle Perioden vom Gewicht 0 sind vermutlich algebraische Zahlen, also Lösungen polynomialer Gleichungen mit rationalen Koeffizienten, aber das ist noch unbewiesen. Die Periode eines Pendels hat stets das Gewicht 1, π ist eine Periode vom Gewicht 2, und das Gewicht eines Werts $\zeta(z)$ der Zetafunktion ist immer $2 \cdot z$; $\zeta(3)$ hat also das Gewicht 6.

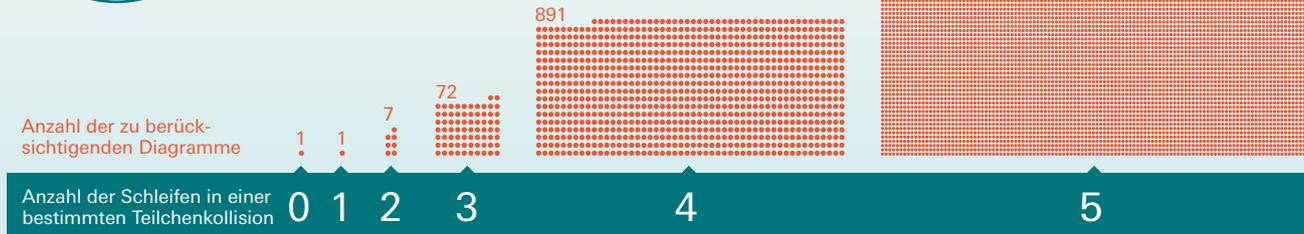
Diese Klassifikation mit Hilfe der Gewichte ist auch auf Feynman-Diagramme übertragbar; und zwar besteht eine

Kombinatorische Explosion

Stoßen zwei Elementarteilchen zusammen, kann allerlei passieren. Selbst wenn man sich auf das Teilchenpaar festlegt, das aus der Kollision hervorgehen soll, sind noch zahlreiche Zwischenschritte denkbar. Insbesondere kann im Verlauf der Reaktion ein Teilchen ein anderes ausstoßen und wieder absorbieren. Das stellt man im



Feynman-Diagramm als »Schleife« dar, eine Linie, deren Anfangs- und Endpunkt identisch sind. Je mehr Schleifen man berücksichtigt, desto genauer wird die Berechnung. Zugleich steigt jedoch die Anzahl der zu berücksichtigenden Feynman-Diagramme (und die Komplexität der zugehörigen Integrale) rapide an. Die Grenze des Berechenbaren liegt zurzeit ungefähr bei zwei Schleifen; Physiker versuchen, sie auf drei bis vier hochzuschrauben.



Verbindung zwischen der Zahl der Schleifen in einem Diagramm und dem Gewicht seiner Amplitude. Diagramme ohne Schleifen haben Amplituden vom Gewicht 0, die Amplituden von Diagrammen mit einer Schleife sind sämtlich Perioden von gemischten Tate-Motiven und haben höchstens das Gewicht 4. Entsprechende Beziehungen gelten vermutlich auch für Diagramme mit weiteren Schleifen, aber die Mathematiker sehen sie noch nicht.

»Wenn wir zu größeren Schleifenanzahlen übergehen, sehen wir Perioden von allgemeineren Typen«, sagt Kreimer. »Das finden die Mathematiker richtig interessant, weil sie über andere als gemischte Tate-Motive kaum etwas wissen.«

Mathematiker und Physiker pendeln im Moment zwischen den beiden Gebieten in dem Bemühen, das Problem besser einzugrenzen und Lösungen zu finden. Dabei schlagen die Mathematiker den Physikern Funktionen (und deren Integrale) vor, die zum Beschreiben von Feynman-Diagrammen geeignet sein könnten. Daraufhin denken sich die Physiker Konfigurationen von Teilchenkollisionen aus, die mit den von den Mathematikern angebotenen Funktionen nicht zu bewältigen sind. »Es ist wirklich erstaunlich zu sehen, wie schnell sie sich technisch anspruchsvolle mathematische Ideen angeeignet haben«, sagt Brown. »Uns sind die klassischen Zahlen und Funktionen ausgegangen, die wir den Physikern noch anbieten können.«

Die Gruppen der Natur

Seit der Entwicklung der Analysis im 17. Jahrhundert haben Zahlen, die in der physikalischen Welt auftreten, den mathematischen Fortschritt vorangetrieben. Das gilt bis heute. Die Tatsache, dass diese Perioden aus der Physik stammen, »verschafft ihnen eine Bedeutung, die über das zweckfreie Glasperlenspiel hinausgeht. Sie haben

eine reichhaltige Struktur, und zwar nicht unbedingt eine, die einem Mathematiker von allein in den Sinn kommt«, sagt Brown.

Und Kreimer ergänzt: »Es scheint so, als ob die Perioden, mit denen die Natur arbeitet, nur eine Teilmenge aller definierbaren Perioden sind. Wir wissen aber noch nicht, wie diese Teilmenge abzugrenzen ist.«

Brown versucht zurzeit zu beweisen, dass die Menge aller Perioden für Feynman-Diagramme eine spezielle mathematische Struktur hat, die durch eine so genannte Galois-Gruppe beschreibbar ist (**Spektrum** April 2012, S. 52). »In jedem Fall, der jemals berechnet wurde, scheint die Antwort Ja zu sein«, sagt er, ein allgemeiner Beweis liegt jedoch noch in weiter Ferne. »Wenn tatsächlich auf den physikalischen Perioden eine Gruppe operiert, dann hätten wir ein mächtiges Arsenal an Symmetrien zur Verfügung«, sagt Brown. »Dann wäre die nächste Frage, wie diese gewaltige Symmetriegruppe aussieht und welche physikalische Bedeutung sie hätte.«

Jeder Fortschritt in dieser Richtung würde die Beziehungen zwischen zwei sehr verschiedenen Bereichen noch weiter vertiefen. Vorläufig bleibt reine Spekulation, was uns die Motive, die ursprünglich der Erforschung sehr mathematischer algebraischer Varietäten dienen, über die sehr physikalischen Kollisionen von Elementarteilchen sagen. ◀

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



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

NAPOLEONS PUNKT UND KIEPERTS HYPERBEL

Die klassische Dreiecksgeometrie bietet zahlreiche Überraschungen, die mit elementaren Mitteln zugänglich sind.



Christoph Pöppe ist Spektrum-Redakteur für Mathematik und Computertechnik.

» spektrum.de/artikel/1478219

► Besondere Punkte im Dreieck – das weckt fast unweigerlich Gedanken an die 9. Klasse. Da gibt es den Umkreis, den Inkreis und den Schwerpunkt eines beliebigen Dreiecks, den Schnittpunkt der Höhen nicht zu vergessen. Jedes Mal sollen sich eigentlich drei Geraden in einem Punkt treffen, verfehlen diesen Treffpunkt aber nur allzu häufig, weil die geheiligten Konstruktionswerkzeuge Zirkel und Lineal immer im falschen Moment wegrutschen oder der Bleistift nicht richtig gespitzt ist. Vor allem aber will das nagende Gefühl nicht weichen, dass nicht nur das Gerät hoffnungslos veraltet ist, sondern das ganze Thema. Und schon kommt die nächste Frage um die Ecke: »Gibt es in der Geometrie – oder überhaupt in der Mathematik – noch etwas Neues?«

Die Antwort – wenig überraschend für regelmäßige Leser dieser Rubrik – lautet Ja. Und was die besonderen Punkte im Dreieck angeht, ist die Flut an Neuigkeiten sogar überwältigend. Clark Kimberling, Mathematikprofessor an der University of Evansville (Indiana), führt im Internet eine Liste dieser Punkte und ihrer Beziehungen zueinander, beginnend mit $X(1)$, dem Inkreismittelpunkt, in dem sich alle drei Winkelhalbierenden treffen. Und die ist in den letzten sieben Jahren immerhin von 3587 auf 13463 Einträge angewachsen.

Da erwacht das Bedürfnis, etwas Übersicht in die Wolke dieser Punkte und ihrer Beziehungen untereinander zu bringen. Es ist hilfreich, dass drei der vier klassischen besonderen Punkte, nämlich Umkreismittelpunkt, Höhenschnittpunkt und Schwerpunkt, auf einer Geraden liegen, der »Euler-Geraden«, und etliche andere Punkte, insbesondere die Höhenfußpunkte und die Mittelpunkte der Seiten, auf einem Kreis. Zu allem Überfluss liegt der

Mittelpunkt dieses »Neunpunktekreises«, auch »Feuerbach-Kreis« genannt, auf der Euler-Geraden.

Die ergiebigste Kurve zum Dreieck geht allerdings über die begrenzte Reichweite von Zirkel und Lineal hinaus. Es ist kein Kreis und keine Gerade, aber immerhin ein Kegelschnitt: die nach Ludwig Kiepert (1846–1934) benannte Hyperbel. Und für den eiligen Touristen in Dreiecksgeometrie, zum Beispiel einen Marsmenschen, der es nur eine Stunde lang auf der Erde aushält, ist die Kiepert-Hyperbel genau die richtige Einführung, weil sie eine Fülle von Einzelergebnissen in einen einheitlichen Rahmen stellt. So sehen es jedenfalls die emeritierten Mathematiker Roland Eddy von der Memorial University of Newfoundland (Kanada) und Rudolf Fritsch von der Universität München.

Fermat, Napoleon, Torricelli, Steiner und andere – alles Spezialfälle von Kiepert

Pierre de Fermat (1607–1665), besser bekannt wegen einer Randbemerkung, die seinen Epigonen 350 Jahre lang Kopfzerbrechen bereitete, und Evangelista Torricelli (1608–1647), den man eigentlich als Erfinder des Quecksilberbarometers kennt, suchten und fanden den Punkt, für den die Summe der Entfernungen zu den Ecken minimal ist – ein Ergebnis, das für die Planung von Straßen oder Telefonleitungen eine gewisse Bedeutung hat (**Spektrum** März 2010, S. 74). In dem Fermat-Torricelli-Punkt, der nach einem späteren Bearbeiter namens Jakob Steiner (1796–1863) auch Steiner-Punkt genannt wird, treffen die Verbindungsstrecken zu den Ecken unter Winkeln von 120 Grad aufeinander; diese Tatsache verhilft zur Konstruktion des Punktes mit Hilfe aufgesetzter gleichseitiger Dreiecke.

Besondere Punkte im Dreieck und die Kiepert-Hyperbel

In einem beliebigen Dreieck (gelb) schneiden sich die drei Seitenhalbierenden (rot), das sind die Verbindungen von einer Ecke zum Mittelpunkt der gegenüberliegenden Seite, in einem Punkt, dem Schwerpunkt S . Die Winkelhalbierenden (grün) schneiden sich in einem Punkt I ; das ist der Mittelpunkt des Inkreises, der alle Seiten von innen berührt. Der Schnittpunkt U der drei Mittelsenkrechten (schwarz) ist zugleich Mittelpunkt des Umkreises, der durch alle drei Eckpunkte geht. Auch die Höhen

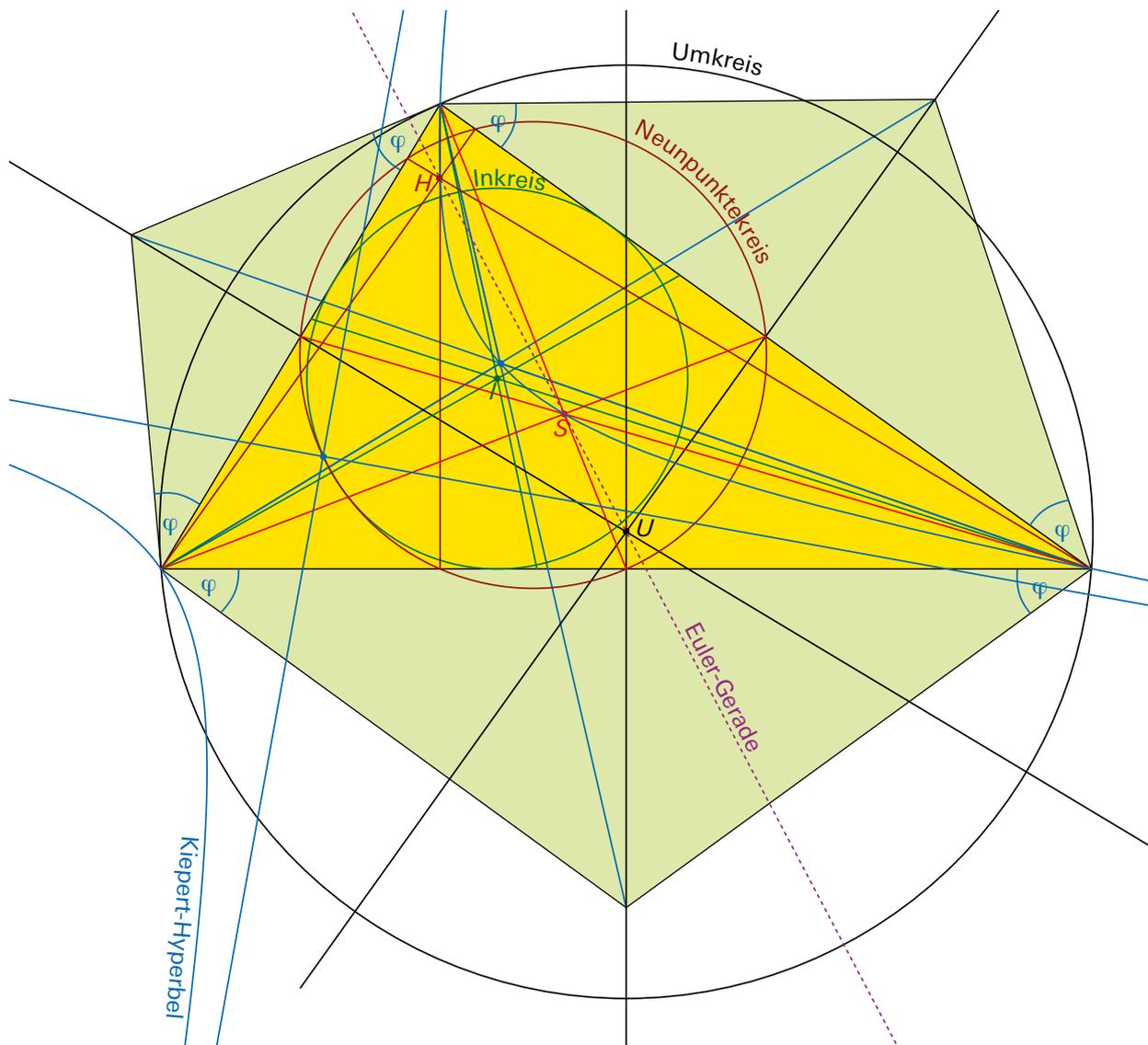
(die Lote von einer Ecke auf die gegenüberliegende Seite, braun) schneiden sich in einem Punkt, dem Höhenschnittpunkt H . Das sind die vier klassischen besonderen Punkte im Dreieck.

Der Neunpunktekreis (braun) geht durch die Mittelpunkte der Seiten, die Fußpunkte der Höhen und einige weitere besondere Punkte.

Das Bild zeigt außerdem für einen speziellen Wert des Winkels φ die Kiepert-Konstruktion, bei der an jede Seite des Dreiecks ein

gleichschenkliges Dreieck mit dem Basiswinkel φ gesetzt und der neue Scheitelpunkt mit der gegenüberliegenden Ecke des Ursprungs Dreiecks verbunden wird. Die drei Verbindungslinien (blau) schneiden sich im Kiepert-Punkt zum Winkel φ .

Eingezeichnet ist die Kiepert-Hyperbel (blau) mitsamt ihren Asymptoten (den Geraden, denen sich die Hyperbel weit draußen nähert); der Punkt, in dem diese sich (rechtwinklig) schneiden, heißt Mittelpunkt der Hyperbel.



Kein Geringerer als Napoleon Bonaparte (1769–1821), besser bekannt als Kaiser der Franzosen, konstruierte zu einem beliebigen Dreieck durch Ansetzen gleichseitiger Dreiecke drei Geraden, die sich stets in einem Punkt schneiden. Unter den besonderen Punkten im Dreieck tragen zwei seinen Namen. Nicht auszudenken, wie die Geschichte Europas verlaufen wäre, wenn Napoleon seine Genialität nicht der Kriegskunst, sondern weiterhin der Mathematik gewidmet hätte!

In krassem Gegensatz zu dessen Berühmtheit steht die Unscheinbarkeit seines Zeitgenossen Vecten, von dem nicht einmal der Vorname überliefert ist. Man weiß nur, dass er zwischen 1810 und 1816 Gymnasiallehrer in Nîmes war und etliche wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht hat. Aber der Punkt, den er fand, ist ungefähr so bedeutend wie der Napoleons.

Diese drei besonderen Punkte (siehe »Konstruktion besonderer Punkte auf der Kiepert-Hyperbel«, unten) und noch viele andere ergeben sich als Spezialfälle von Kieperts Konstruktionsanweisung: Man setze an jede Seite des Dreiecks ein gleichschenkliges Dreieck mit dem Basiswinkel φ und verbinde den neu entstehenden Scheitelpunkt mit der gegenüberliegenden Ecke des Ursprungsdreiecks. Die Verbindungslinien schneiden sich in einem Punkt, dem Kiepert-Punkt zum Winkel φ .

Nun kann der Basiswinkel φ variieren: von 0 bis 90 Grad, wodurch die gleichschenkligen Dreiecke immer größer und spitzer werden, bis schließlich der Scheitelpunkt im Unendlichen verschwindet, und von 0 bis -90 Grad, wobei die negativen Werte nach innen angesetzten Dreiecken entsprechen. Während φ sich verändert, läuft der so konstruierte besondere Punkt auf einer Hyperbel, der Kiepert-Hyperbel (siehe »Besondere Punkte im Dreieck und die Kiepert-Hyperbel«, S. 73).

Der Winkel $\varphi = 0$ entspricht entarteten Dreiecken, deren Scheitel auf dem Mittelpunkt der jeweiligen Seite liegt. Deren Kiepert-Punkt ist identisch mit dem Schwerpunkt S . Der Höhenschnittpunkt, durch den die Kiepert-Hyperbel ebenfalls verläuft, gehört zu den entarteten Dreiecken mit $\varphi = \pm 90^\circ$. Und immer dann, wenn φ gleich einem der Innenwinkel des Ursprungsdreiecks ist, fällt der Kiepert-Punkt mit der zugehörigen Ecke zusammen.

So bringt die Kiepert-Hyperbel das Kunststück fertig, nicht nur alle drei Eckpunkte aufzusuchen, sondern auch eine große Anzahl von besonderen Punkten. Das gelingt ihr nur deshalb, weil sie, wie bei Hyperbeln üblich, aus zwei verschiedenen Ästen besteht.

Die Kunst der Spiegelung an den Winkelhalbierenden

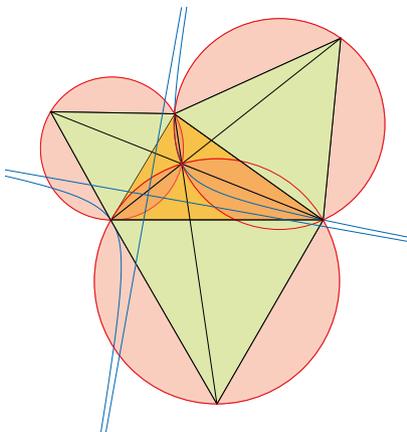
Mittlerweile ist es unter Geraden im Dreieck sozusagen wieder Mode geworden, sich zu dritt in einem Punkt zu treffen. Man nehme einen Punkt P innerhalb oder außerhalb des Dreiecks und verbinde ihn mit den drei Eckpunkten A , B und C . Dann treffen sich alle drei Verbindungslinien im Punkt P – kein Wunder, so haben wir sie konstruiert. Aber: Spiegelt man jede dieser Linien an der zugehörigen Winkelhalbierenden, also die Gerade PA an der Winkelhalbierenden durch den Eckpunkt A und so weiter, dann treffen sich die gespiegelten Geraden wieder in einem Punkt; nennen wir ihn P' . Das ist nun alles andere als offensichtlich. Für den Beweis muss man zum Beispiel auf raffinierte Weise den Satz von Ceva anwenden; und von dem hat man in der Schule in der Regel nichts gehört.

Wendet man das Rezept, das aus P den Punkt P' macht, auf P' an, so landet man wieder bei P ; denn beim erneuten Spiegeln werden aus den Verbindungslinien von P' mit den Ecken wieder die alten, die durch P und jeweils eine Ecke verlaufen, und deren Schnittpunkt ist – kein

Konstruktion besonderer Punkte auf der Kiepert-Hyperbel

Der Fermat-Torricelli-Punkt:

Man setze auf die Seiten eines beliebigen Dreiecks gleichseitige

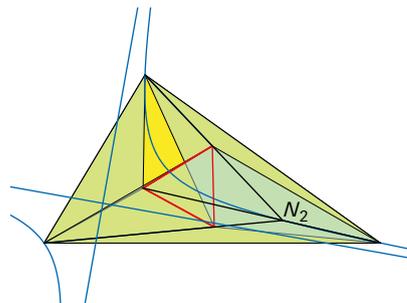


CHRISTOPH RÖPKE NACH NORBERT TREITZ

Dreiecke auf (hellgrün) und verbinde die neue Ecke jedes dieser Dreiecke mit dem gegenüberliegenden Eckpunkt des Ursprungsdreiecks. Das ist die Kiepert-Konstruktion mit dem Basiswinkel $\varphi = 60^\circ$. Die Verbindungslinien (schwarz) treffen sich im Fermat-Torricelli-Punkt (auch Steiner-Punkt genannt); im selben Punkt schneiden sich die Umkreise der aufgesetzten Dreiecke (rosa). In jedem dieser Kreise kann man den Satz vom Umfangswinkel anwenden mit dem Ergebnis, dass die Verbindungsstrecken zu den Ecken des Ursprungsdreiecks den Winkel 120° miteinander bilden.

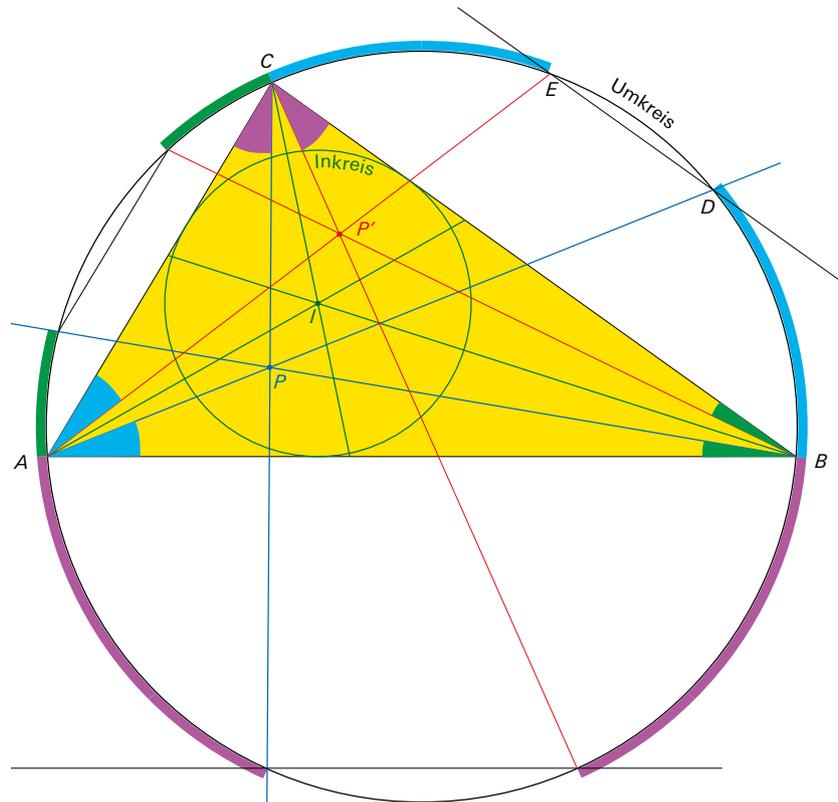
Die Napoleon-Punkte:

Man verbinde nicht den neuen Eckpunkt des aufgesetzten gleichseitigen Dreiecks, sondern dessen Mittelpunkt mit dem gegenüberliegenden Eckpunkt des Ursprungsdreiecks. Die Verbindungslinien



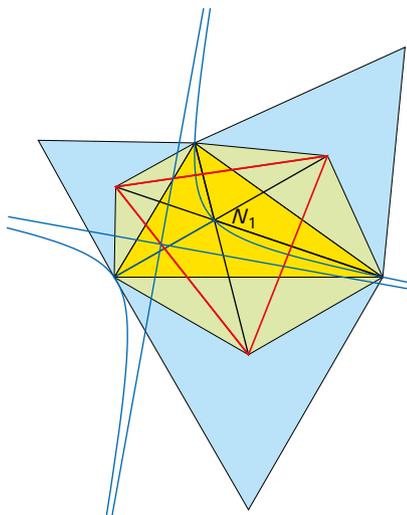
Konstruktion des isogonal konjugierten Punktes

Man verlängere die Verbindungslinie (blau) vom Punkt P zur Ecke A , bis sie den Umkreis zum zweiten Mal trifft (das erste Mal war in der Ecke). Durch den Schnittpunkt D mit dem Umkreis ziehe man eine Parallele zu der Dreiecksseite BC , die der gewählten Ecke A gegenüber liegt. Die beiden parallelen Sehnen BC und DE schneiden (aus Symmetriegründen) aus dem Umkreis zwei gleiche Bögen BD und EC aus (hellblau markiert). Zu gleichen Bögen gehören (in ein und demselben Kreis) gleiche Winkel. Also sind die beiden hellblau markierten Winkel im Punkt A gleich, und deshalb bildet die Gerade AE mit der Winkelhalbierenden (die wir bei der Konstruktion nicht gebraucht haben) den gleichen Winkel wie AD . Also ist AE das Spiegelbild von AD bezüglich der Winkelhalbierenden durch A . Dieselbe Argumentation gilt für die beiden anderen Eckpunkte B und C .



CHRISTOPH PÖPPE, NACH: NORBERT TREITZ

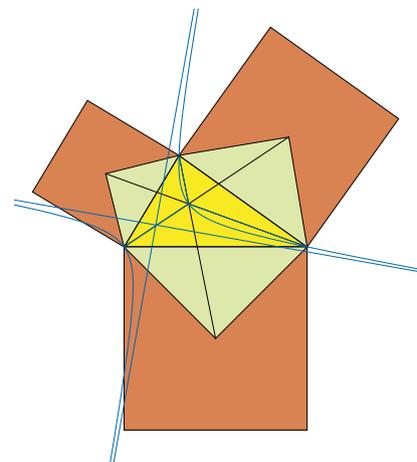
(schwarz) treffen sich in einem Punkt, und zwar dem ersten Napo-



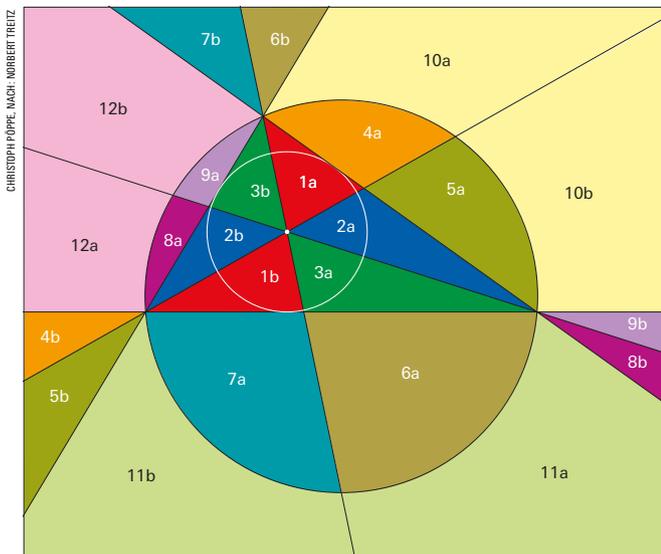
leon-Punkt N_1 , wenn die gleichseitigen Dreiecke nach außen angesetzt werden (rechtes Teilbild). Setzt man sie nach innen an, so dass sie einander und das Ursprungsdreieck teilweise überdecken, so entsteht der zweite Napoleon-Punkt N_2 (linkes Teilbild). Beide Punkte liegen auf der Kiepert-Hyperbel (blau), und die Mittelpunkte der Dreiecke bilden in beiden Fällen ihrerseits ein gleichseitiges Dreieck (rot).

Vecten-Punkte: An Stelle der gleichseitigen Dreiecke setze man Quadrate (braun) auf die Dreiecksseiten auf und verwende deren Mittelpunkte. Der zweite Vecten-Punkt entsteht, indem man die Quadrate nach

innen statt nach außen ansetzt. Das sieht dann sehr unübersichtlich aus (und ist deswegen nicht abgebildet).



CHRISTOPH PÖPPE, NACH: NORBERT TREITZ



Die drei Winkelhalbierenden zerlegen das Dreieck in sechs Teilflächen. Diese bilden drei Paare, deren Partner durch die isogonale Konjugation aufeinander abgebildet werden. Die Verlängerungen der Dreiecksseiten und der Winkelhalbierenden sowie der Umkreis teilen das Äußere des Dreiecks in neun weitere Paare auf. Die Partner eines Paares tragen die gleiche Farbe und die gleiche Nummer sowie zur Unterscheidung die Kennzeichen *a* und *b*.

Wunder – *P*. Man nennt die beiden Punkte *P* und *P'* »isogonal konjugiert« zueinander (isogonal wie gleichwinklig), denn es kommt nicht darauf an, wer zu wem konjugiert ist.

Interessanterweise gibt es ein Verfahren zur Konstruktion des isogonal konjugierten Punktes, das von den Winkelhalbierenden überhaupt keinen Gebrauch macht (siehe »Konstruktion des isogonal konjugierten Punktes«, S. 75).

Ebenso wie die gewöhnliche Spiegelung ist die isogonale Konjugation ihre eigene Umkehrung; aber sie ist viel komplizierter. Unter besonderen Umständen treffen sich die drei gespiegelten Geraden nicht in einem Punkt, sondern sind parallel, und zwar genau dann, wenn *P* auf dem Umkreis des Dreiecks liegt. Das gilt auch für die Eckpunkte des Dreiecks, denn sie liegen auf dem Umkreis. Im Rahmen der projektiven Geometrie kann man die Redensart »Parallelen schneiden sich im Unendlichen« zu einer sinnvollen mathematischen Aussage machen. Mit Begriffsbildungen wie »unendlich ferne Punkte« und »unendlich ferne Gerade« kann man die Ausnahmen in die allgemeine Darstellung einordnen, aber nicht ganz. So kommt man zwar von einem Punkt auf einer Dreiecksseite durch isogonale Konjugation stets auf die gegenüberliegende Ecke, aber von dort aus nicht in eindeutiger Weise zurück.

Immerhin bildet die isogonale Konjugation, von gewissen Ausnahmepunkten und -linien abgesehen, die ganze Ebene auf sich selbst ab, und zwar das Innere des Dreiecks auf das Innere und das Äußere auf das Äußere. Genauer:

Die isogonale Konjugation zerlegt die Ebene in zwölf Paare von Teilflächen, die jeweils aufeinander abgebildet werden (Bild links). Die einzigen Punkte, die auf sich selbst abgebildet werden, sind der Inkreismittelpunkt sowie die Mittelpunkte der drei Ankreise, das sind die Kreise, die eine Dreiecksseite (von außen) sowie die Verlängerungen der beiden anderen Dreiecksseiten berühren.

Wie nicht anders zu erwarten, stellt diese Abbildung auch Beziehungen zwischen besonderen Punkten des Dreiecks her. Der Umkreismittelpunkt und der Schnittpunkt der Höhen sind isogonal konjugiert zueinander, ebenso der Schwerpunkt und der so genannte Grebe-Lemoine-Punkt, dessen besondere Qualitäten sich allerdings erst nach intensiver Beschäftigung erschließen. Und aus der Kiepert-Hyperbel mit all den besonderen Punkten, die auf ihr liegen, wird etwas sehr Einfaches: eine Gerade, die nach dem antiken Geometer Apollonius benannt ist und gleichfalls etliche besondere Punkte enthält.

Dreiecksgeometrie:

Trainingsplatz für mathematische Junggenies

Die Geometrie des Dreiecks ist eine reichhaltige Fundgrube für die erstaunlichsten Zusammenhänge; gleichwohl sind ihre theoretischen Mittel sehr elementar und waren im Grundsatz schon der griechischen Antike bekannt. Zugleich erfordert das Auffinden dieser Zusammenhänge viel Fantasie. Diese beiden Eigenschaften zusammen machen die Dreiecksgeometrie zu einem hervorragend geeigneten Thema für Mathematikwettbewerbe für Schüler. Die Wettbewerbsteilnehmer ihrerseits haben über die Aufgaben weiter nachgedacht und damit die Theorie maßgeblich vorangetrieben, namentlich Darj Grinberg (Silbermedaillen 2004 und 2005, Goldmedaille 2006 bei der Internationalen Mathematik-Olympiade), der inzwischen Professor an der University of Minnesota ist.

Für das ungeliebte antike Zeichenwerkzeug gibt es übrigens mittlerweile einen bequemen Ersatz. Mit moderner Geometrie-Software verrutscht gar nichts mehr, und man kann sogar nachträglich an einem bereits gezeichneten Punkt wackeln. Dann gehen alle von ihm abhängigen Punkte mit. Natürlich rechnen solche Programme intern mit Koordinaten – ein Graus für den Geometer alten Schlags, der stolz darauf ist, ohne diese willkürlich zu wählenden Krücken auszukommen. Und dann die dreckigen Näherungen an die echten reellen Zahlen mit den unvermeidlichen Rundungsfehlern! Na ja – besser als mein Schulzirkel sind sie allemal. ◀

QUELLEN

Der vorliegende Text ist inspiriert von mehreren »Treiz-Rätseln«. **Spektrum** veröffentlicht online jeden Werktag ein Rätsel von Norbert Treitz, pensionierter Professor für Didaktik der Physik aus Duisburg und langjähriger Autor der »Physikalischen Unterhaltungen«: www.spektrum.de/raetsel.

Eddy, R. H., Fritsch, R.: The Conics of Ludwig Kiepert: A Comprehensive Lesson in the Geometry of the Triangle. In: Mathematics Magazine 67, S. 188–205, 1994. Online unter https://epub.ub.uni-muenchen.de/4550/1/Fritsch_Rudolf_4550.pdf

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft
in die schulen!

AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

Das Projekt **wissenschaft in die schulen!**

Jugendliche nachhaltig für Naturwissenschaft begeistern – das ist das Ziel der Initiative **wissenschaft in die schulen!** Wir zeigen durch unsere Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Themen aus der Forschung, dass Biologie, Physik, Chemie, Mathematik, Geowissenschaften und Astronomie spannende Fächer sind. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie sowie das Max-Planck-Institut für Astronomie.

Unterstützen Sie das Projekt!

Ohne weitere Partner ist die Realisierung des Projekts nicht möglich. Deshalb möchten wir Sie einladen, das Projekt aktiv zu unterstützen. Wenn Sie wissen wollen, wie Sie sich persönlich oder als Firma einsetzen können, dann finden Sie hier Informationen dazu: www.wissenschaft-schulen.de

Tausende Schüler sind schon dabei. Herzlichen Dank an unsere Sponsoren!



BSZ für Agrarwirtschaft und Ernährung
Dresden

INNO-TEC



Förderverein Eichsfeld-Gymnasium

REFORMATION EINE GELEHRTENDEBATTE ESKALIERT



AKG IMAGES / PROTESTANTISCHES FLUGBLATT, HOLZSCHNITT, 1588

Zu Anfang war es nur ein Streit unter Theologen. Doch Luthers Thesen bargen einen Sprengstoff, der die Kirche innerhalb weniger Jahre spaltete. Eine neue Sichtweise auf die Schriftquellen macht diese Dynamik verständlich.



Der deutsche Historiker **Volker Reinhardt** lehrt Allgemeine und Schweizer Geschichte an der Universität Freiburg (Schweiz). Er ist einer der führenden Experten für die italienische Renaissance und das neuzeitliche Papsttum. Als einer der Ersten interpretierte er den Briefwechsel zwischen Luther und dem Vatikan unter rein historischen Aspekten. Alle Zitate des Artikels sind seinem Buch entnommen.

» spektrum.de/artikel/1478221



ANG IMAGES/PROTESTANTISCHES FLUGBLATT, HOLZSCHNITT, 1560

»Der Verrückte war lachend eingetreten und hatte vor dem Kaiser andauernd mit dem Kopf gewackelt. Nachdem sie ihn gesehen haben, halten ihn viele von denjenigen, die ihn an sich begünstigen, entweder für verrückt oder für vom Teufel besessen.« Derart abfällig schilderte der päpstliche Gesandte Girolamo Aleandro den Auftritt Martin Luthers auf dem Reichstag in Worms im April 1521. Knapp dreieinhalb Jahre waren seit der Veröffentlichung der 95 Thesen vergangen (dass Luther sie an die Schlosskirche von Wittenberg anschlug, ist eine frühe Legendenbildung), nun sollten die weltlichen Herrscher ihr Urteil sprechen. Doch so sehr sich der Nuntius darüber auch empörte: Am Ende zog der Ketzler aus der germanischen Provinz unbeschadet davon.

Die Kirche war damit gespalten, und das ist sie bis heute. Protestanten und Katholiken gehen nach Jahrhunderten wüster Polemik zwar inzwischen freundlicher miteinander um, doch in fundamentalen Fragen herrscht weiterhin Uneinigkeit. Umso wichtiger ist es, zu begreifen, wie eine theologische Fachdebatte derart eskalieren konnte.

Antwort findet nur, wer neben dem Standpunkt Luthers und seines Umfelds auch die Positionen des Papstes und der Kurie, also seines Verwaltungs- und Herrschaftsapparats miteinbezieht. Dafür gibt es diverse Schriftzeugnisse, die zwar seit Langem bekannt sind, bislang aber ungenügend ausgewertet wurden. Zu diesen Quellen gehören insbesondere die Gutachten jener katholischen Experten,

Der Reformator bringt den Stuhl Petri ins Wackeln und weicht nicht vor der Macht der katholischen Kirche.

500 Jahre Reformation

Teil 1: August 2017
Eine Gelehrtendebatte eskaliert
 Volker Reinhardt

Teil 2: September 2017
Warum das Mittelalter die Reformation vorbereitete
 Volker Leppin

die Luthers Thesen widerlegen sollten, und die Briefe, die Aleandro vom Reichstag an die päpstliche Zentrale schrieb. All diese Texte wurden zwar bereits kommentiert und interpretiert, am gründlichsten von dem Kirchenhistoriker Friedrich Lauchert (1863–1944), doch zumeist blieb es bei theologischen Fragestellungen. Erst seit Kurzem berücksichtigen Forscher geschichtliche Rahmenbedingungen wie den herrschenden Zeitgeist oder Vorurteile gegenüber den nationalen Kulturen des jeweiligen Kontrahenten. Um es vorwegzunehmen: Eine Verständigung zwischen den beiden geistlichen Lagern war demnach von vornherein ausgeschlossen.

»Wenn das Geld im Kasten klingt, die Seele in den Himmel springt«

Anlass für die Ausarbeitung der 95 Thesen, die Luther am 31. Oktober 1517 anderen Theologen schickte, war die Praxis der Ablassbriefe, lateinisch »indulgentia«. Gemäß kirchlicher Auffassung tilgten oder reduzierten sie die Strafen, die ein Mensch für seine Sünden im Fegefeuer abzusitzen hatte. Dass solche Indulgenzen nur wirksam wurden, wenn sie mit Zerknirschung und Bußfertigkeit einhergingen, geriet bei den marktschreierischen Verkaufskampagnen oft in Vergessenheit: »Wenn das Geld im Kasten klingt, die Seele in den Himmel springt.«

Für Luther war dieser Handel in mehrfacher Hinsicht skandalös. Seiner Meinung nach vermochte keine diesseitige Macht einen Straferlass im Jenseits herbeizuführen, auch nicht der Papst. Weil der mit der Ausstellung von Ablassbriefen aber genau diese Kompetenz für sich in Anspruch nahm, war er entweder ein Lügner oder zumindest sehr schlecht unterrichtet. Um einem eventuellen Informationsmangel abzuwehren, verfasste Luther seine Thesen – glaubt man ihrem Wortlaut. In Wirklichkeit aber ging er viel weiter. Indem er erklärte, der Inhaber des Stuhls Petri könne nur solche Strafen aufheben, die er selbst ausgesprochen habe, nicht aber eine von Gott verhängte Zeit im Fegefeuer abkürzen, bestritt der Wittenberger Theologe die doppelte Schlüsselgewalt, die Päpste seit mehr als 1000 Jahren für sich in Anspruch genommen hatten: Als »vicarius Christi«,



KUNSTIMAGES: FERDINAND BRONKHORST: PAPST LEO X., GEMÄLDE, 1517/18

Kann der Papst einer Seele die Leiden des Fegefeuers ersparen? Leo X. nahm diese Kompetenz für sich in Anspruch und machte sie zur Grundlage eines einträglichen Geschäfts.

also als Stellvertreter des Gottessohns auf Erden, könne er die Bösen zur Hölle verdammen und die Guten zum Paradies erlösen. Dies ist übrigens auch heute noch die Sichtweise der katholischen Kirche.

Mit seiner Kritik an den Ablässen bestritt Luther zugleich die Existenz des so genannten Kirchenschatzes. Dieser bestand – und besteht nach offizieller Lehre ebenfalls heute noch – aus den Verdiensten Christi und der Heiligen, die sie mit ihren guten Werken erworben hatten, selbst aber nicht benötigen. Anteile daran den sündhaften Gläubigen zukommen zu lassen, lieferte die Basis des Ablasshandels. Mit Entrichtung des Kaufpreises erwarb man sozusagen eine vom Papst ausgestellte Heilsaktie. Luther galt das alles als profitorientierte Erfindung.

In diesem Stil ging es von These zu These weiter. Am Ende war ein äußerst unvorteilhaftes Bild vom Papsttum entworfen. Die angeblichen Stellvertreter Christi auf Erden verlören sich in Äußerlichkeiten wie dem aufwändigen Bau einer neuen Peterskirche, für den die Ablassgewinne unter anderem bestimmt waren. Offenbar verstanden sie nicht, dass Christus nicht auf prunkvolle Gebäude, sondern ins Innere des Menschen schaue. Statt ihr oft hart verdientes Geld für wirkungslose Ablassbriefe zu verschwenden, sollten die Gläubigen den Bedürftigen spenden. Ein guter Papst müsse sie dazu ermahnen und durch sein persönliches Beispiel erziehen. Er müsse beten, weinen, Nachtwachen halten, das Leid der Menschen teilen und auf sich nehmen.

War das noch Kritik im Rahmen des Erlaubten oder bereits Ketzerei? Luther berief sich in seinen Thesen darauf, dass es zu Ablass und Kirchenschatz keine verbindlichen Entscheidungen der Kirche gebe – und mahnte diese propagandistisch effektiv an. Die römischen Theologen

AUF EINEN BLICK HÄRETIKER KONTRA ANTICHRIST

- 1 Was Christus und die Heiligen einst an guten Werken vollbracht hatten, gab der Papst gegen eine Gebühr an die sündigen Menschen weiter – so lautete die Theorie des Ablasshandels.
- 2 Indem Martin Luther der Verfügungsgewalt über den »Kirchenschatz« widersprach, kritisierte er ein Kernelement des päpstlichen Selbstverständnisses.
- 3 Vom Vatikan schnell als Ketzer betrachtet, wurde Luther in seiner Kritik im Gegenzug immer radikaler, bis er den Papst als Vertreter des Bösen diffamierte.

hingegen, die sich im Auftrag Leos X. (Papst 1513–1521) mit den Thesen befassten, verwiesen darauf, dass zahlreiche Päpste den Ablass durchaus genehmigt und die entsprechende Praxis geregelt hätten. Damit war die Auseinandersetzung um weitergehende Fragen eskaliert: Wer hatte die Autorität, die Heilige Schrift verbindlich auszulegen? Bestimmte der Papst allein, welche Heilsbotschaften Gottes die Menschen erreichten, oder war er nur das Sprachrohr der Kirche und Medium ihrer Wahrheitsfindung?

Das war eine heikle Materie. Schon am 3. Februar 1518 forderte Leo X. den General der Augustiner-Eremiten, denen Luther angehörte, dringend zum Eingreifen auf: »Wenn du das schnell bewerkstelligst, lässt sich meiner Meinung nach diese Flamme schnell ersticken ... Wenn du aber zuwartest und das Übel an Kräften zunimmt, so fürchte ich, dass wir den Brand mit keinem Mittel mehr eindämmen können.« Doch solch schnelle Gegenmaßnahmen blieben aus.

Drei Tage zur Prüfung der Thesen – für den päpstlichen Hoftheologen ist die Angelegenheit rasch klar

Der Theologieprofessor an der Provinzuniversität Wittenberg entpuppte sich nun als Kommunikations- und Medienexperte. Mit seinen rasch aufeinander folgenden Publikationen gewann er in der deutschen Öffentlichkeit eine Meinungshoheit, die er jahrzehntelang nicht mehr verlieren sollte. Ein besonders kluger Schachzug war ein Brief an Leo X. vom 30. Mai 1518, den Luther ebenfalls publizierte. Er wolle den Papst vor schlechten Ratgebern schützen, über die in seinem Namen erfolgten Missgriffe aufklären und letztlich über seine Pflichten als Haupt der Christenheit unterrichten. In römischen Augen war das eine ungeheuerliche Anmaßung: Ein aufmüpfiger Mönch aus Germanien erdreistete sich, den »vicarius Christi« über seine Amtsführung zu belehren.

Somit war es höchste Zeit für eine offizielle Replik. Der für solche Fälle zuständige päpstliche Haus- und Hoftheologe Silvestro Mazzolini, nach seinem piemontesischen Geburtsort Prierias genannt, machte sich im Juni daran, eine solche zu verfassen. Diese Personalie barg neuen Zündstoff, denn Prierias war Thomist, also in der Lehrtradition Thomas' von Aquin aufgewachsen. Dessen Autorität aber hatte Luther in seinem letzten Brief an Leo X. zurückgewiesen, weil er die Fantasien des heidnischen Philosophen Aristoteles mit den heiligen Lehrensätzen des Christentums vermengt und diese damit entstellt habe. Das waren keine guten Voraussetzungen für eine fruchtbare Diskussion, geschweige denn für eine gütliche Einigung über die wahre Ordnung der Kirche.

Nach eigener Aussage opferte Prierias aber der Thesenwiderlegung gerade einmal drei Sommertage. Diese Zeitangabe ist glaubwürdig, denn mit Einzelheiten oder gar einer Erörterung aller 95 Sätze hielt sich der »Magister des heiligen Palastes« nicht auf. Wozu auch? Für Prierias ließen sich die Thesen einfach auf den Punkt bringen: Luther kläffte darin wie ein Hund. Mit diesem Schimpfwort war Luther als Barbar brandmarkt, der den triebhaften Tieren näherstand als vernunftgeleiteten Menschen. Barbaren waren für gebildete Italiener seit 200 Jahren alle Nationen außer der eigenen, wenn auch mit

Abstufungen. Ganz unten auf einer Skala der Triebhaftigkeit, Rohheit, Trunkenheit, Dumpfheit, Ungeschlachtheit und Selbstüberschätzung standen aber die Deutschen in ihren kalten und sumpfigen Wäldern. Das hatte der römische Historiker Tacitus schon um 100 n. Chr. beobachtet und Enea Silvio Piccolomini, der spätere Papst Pius II., kurz nach der Mitte des 15. Jahrhunderts aus intimer Kenntnis von Land und Leuten bestätigt.

Zum Vergleich: Als der italienische Philosoph Pietro Pomponazzi (1462–1525) in Bologna lehrte, die Unsterblichkeit der Seele sei mit Vernunftgründen nicht zu beweisen, ließen sich die kirchlichen Gelehrten immerhin so weit auf eine Diskussion ein, dass sie versuchten, seine Argumente zu entkräften. Am Ende verurteilten sie zwar Pomponazzis These, ließen ihm aber trotzdem seinen Lehrstuhl.

Als deutscher Barbar hatte Luther derartiges Entgegenkommen nicht zu erwarten. Und als solcher verhielt er sich in den Augen Prierias' schon durch die beispiellose Arroganz, mit der er dem Papst gegenübertrat. So ließ er es an jeglichem Anstand und Gefühl für die Würde des Amtes und seines Inhabers fehlen: »Ich fürchte, dass du das Urteil Gottes auf dein Haupt heraufbeschwörst, wenn du vor der ganzen Welt mit Ironie und Spott über einen so großen Papst sprichst.« Nicht minder barbarisch war seine Argumentation in ihrer Gesamtheit, da sie die vierfache Grundlegung der Kirche in Frage stellte. Diese lautet: Der Papst ist die Kirche; der Papst kann in wichtigen Lehrentscheidungen nicht irren; wer die Lehre des Papstes nicht akzeptiert, steht außerhalb der Kirche und ist damit ein Ketzer; Ketzer ist in noch höherem Maß, wer Lehre und Tätigkeit der Kirche in den Bereichen Glauben und Glaubenspraxis herabsetzt. Für jeden römischen Theologen war das eine Selbstverständlichkeit.

Damit hatte Prierias sein Urteil gefällt. Mit der Kritik am Ablasshandel stellte Luther die Autorität des Papstes als Stellvertreter Christi auf Erden in Frage; dadurch hatte er sich offensichtlich außerhalb der christlichen Glaubensgemeinschaft positioniert. Der Wittenberger stand in einer langen Reihe von Abweichlern, die seit der Frühzeit der Kirche, vom Teufel angetrieben, den Stachel gegen das



In seiner polemischen Schrift zeigte der Franziskaner Thomas Murner Luther als Narren, der auf den Teufel hereinfällt und für ihn die Spaltung der Kirche betreibt.

Papsttum und damit gegen die Wahrheit und ihre Zeugen löckten.

Schon vorher hatte Luther mehr oder weniger unterschwellig nationale Töne angeschlagen: durch beißende Kritik an den römischen Hofschranzen einerseits, einer Selbststilisierung als aufrechter Streiter für die lautere Wahrheit andererseits. Unbeugsame Wahrheits- und Freiheitsliebe hatten die deutschen Humanisten seit einigen Jahrzehnten als die hervorstechenden Eigenschaften ihrer Nation verkündet. Diese nationale Polemik entfaltete Luther als Reaktion auf die ihm übermittelte Verurteilung durch den römischen Hoftheologen virtuos: Thomisten wie Prierias seien aalglatte Italiener, hinter deren glänzender Fassade sich Atheismus und Treulosigkeit verbargen: »Zu mir gelangte, ehrwürdiger Vater, ein von dir verfasster, reichlich überheblicher, ganz und gar italienischer und

»Mit solchen himmelschreienden Unsinnigkeiten gewinnt dieses Ungeheuer die Dummen für sich«

Martin Luther

thomistischer Dialog.« In den ab den 1530er Jahren aufgezeichneten Tischreden vollzog Luther diese Gleichsetzung geradezu leitmotivisch: Anhänger des Papstes gleich Römer gleich Italiener gleich von Gott verworfene Nation.

Die Entwicklung überrascht nicht. Schon lange vor Luther berichteten Diplomaten des Vatikans in Deutschland und den Niederlanden, dass der Kredit Roms in diesen Gegenden verbraucht sei und man dort päpstlichen Verlautbarungen keinen Glauben mehr schenke. Doch das wollten ihre Auftraggeber nicht hören, stattdessen wiegten sie sich in der Illusion, dass die großen theologischen Konflikte der Vergangenheit ein für alle Mal zu Gunsten Roms entschieden seien.

Luther hingegen riss alte Wunden auf. Zu Beginn des 15. Jahrhunderts hatten bis zu drei Päpste gleichzeitig die geistliche Führung der Christenheit für sich reklamiert. Erst das von 1414 bis 1418 in Konstanz tagende Konzil vermochte die Spaltung aufzuheben und einen einzigen Inhaber des Throns Petri durchzusetzen, dazu musste die Versammlung erst einmal selbst die Oberhoheit über die Kirche beanspruchen. Diese Bevormundung durch Konzilien hatten die Päpste zwar wenige Jahrzehnte später wieder abgeschüttelt, doch die Erinnerung an diese Niederlage war noch lebendig. Auch deshalb zeigte die Kurie keinerlei Bereitschaft, über die Thesen eines Mönchs aus Deutschland zu diskutieren, der die Macht des Papstes erneut drastisch beschneiden wollte.

1519 unterließ Leo X. noch weitere Schritte, denn er hoffte, dass Luthers Landesherr und Förderer, Kurfürst Friedrich der Weise, zum neuen Kaiser des Heiligen Römischen Reiches Deutscher Nation gewählt werden würde. Als stattdessen der habsburgische König von Spanien als Karl V. den Thron bestieg, wurde das Ketzereiverfahren

vorangetrieben. Am 15. Juni 1520 stellte der Papst die Bannandrohungsbulle aus, am 3. Januar 1521 den formellen Bann. Luther war damit als verurteilter Häretiker aus der Kirche und der Gemeinschaft der Gläubigen ausgeschlossen. Unmittelbare Folgen hatte diese Exkommunikation jedoch nicht, weil Friedrich der Weise weiterhin seine schützende Hand über den Wittenberger Professor hielt.

Der sah umgekehrt in Leo X. inzwischen den Antichristen, also das personifizierte Böse der Endzeit, das den Untergang der Welt einleitete, hielt der Papst doch immer noch an seiner Machtstellung im Diesseits und für das Jenseits fest und stellte sich mit seinem Auslegungsmonopol der Bibel über die Heilige Schrift und damit letztlich über Jesus Christus. Folgerichtig fragten Luther und seine wachsende Anhängerschar nach den wahren Autoritäten für die Glaubenslehre. Eine Zeit lang neigte Luther dem Konzil als höchster Instanz zu, verwarf diesen Ansatz aber wieder. So blieb nur die Heilige Schrift selbst als alleinige Quelle der Wahrheit: das Evangelium in seiner von Gott gegebenen Aussage und Bedeutung; beziehungsweise das Evangelium, das Martin Luther als Dolmetscher des Herrn in seinem vom Papst bewusst verdunkelten Sinn wieder ans Tageslicht gebracht hatte.

»Post tenebras lux« – nach der Finsternis das Licht. Mit diesem Slogan sollten alle Reformatoren und Reformationen in der Folgezeit erfolgreich Werbung machen, sei es Zwingli in Zürich oder Calvin in Genf. Für die römischen Theologen aber hatte sich Luther »in einen so zügellosen Wahnsinn hineingesteigert, dass er in seinen Verkündigungen einzig und allein seine eigene Autorität, sein Urteil, sein Verständnis der Schrift allen anderen Verlautbarungen von Universitäten, Kirchenlehrern, ökumenischen Konzilien oder Päpsten voranstellt«.

Luthers Position wird immer radikaler:

Das Fegefeuer ist die Erfindung von Theologen

Mit der Ablehnung der Lehrautorität von Papst und Konzil wurde das ganze Konstrukt der alten Kirche für Luther hinfällig: Das Fegefeuer war eine Erfindung römischer Theologen, um die Gewissen der armen Christen zu peinigen und ihnen Geld abzupressen, ebenso wie der geistliche Stand und die Heilswirksamkeit der guten Werke. Gerecht vor Gott wurde der Mensch nicht durch Gehorsam gegenüber der Kirche und auch nicht durch ihre Sakramente, von denen Luther nur Taufe und Abendmahl als reine Stärkungszeichen gelten ließ. Gerecht vor Gott wurde der stets sündige Mensch allein durch den Glauben, den er aber nur durch Gottes Gnade dauerhaft bewahren konnte. Diese wurde jedoch nur jenen Auserwählten zuteil, die Gott schon lange vor ihrer Geburt in seinem unerforschlichen Ratschluss bestimmt hatte. So konnte der Mensch selbst eigentlich nichts für sein Heil tun, als auf die Barmherzigkeit Christi zu vertrauen. Die schroffe Prädestinationstheorie wurde von Humanisten wie Erasmus von Rotterdam als Absage an alles sittliche Eigenstreben der Menschen zurückgewiesen und von römischer Seite als weiterer Beleg für eine barbarische Theologie gewertet.

Wer aber sollte künftig die Kirche regieren? Der Papst und seine Kirchenfürsten waren für Luther diskreditiert. So



Bereits 1518 war Martin Luther auf dem Reichstag in Augsburg von einem Abgesandten des Papstes, Kardinal Cajetan, verhört und zum Widerruf aufgefordert worden.

blieben nur die weltlichen Herrscher als Ersatzbischöfe übrig. Sie hatten die neue geistliche Ordnung durchzusetzen, also einerseits Klöster aufzulösen und zu enteignen, andererseits Schulbildung und Sozialfürsorge zu übernehmen. Für Rom passte auch dieses letzte Puzzlestück ins nachtschwarze Bild: Luther war eine Marionette der Fürsten, lieferte ihnen die Gründe, sich zu nehmen, wonach sie schon lange gierten, nämlich die Hoheit über die Kirche und die Verfügungsgewalt über ihre Güter.

Als Karl V. den Begründer der Reformation im April 1521 vor den Reichstag von Worms lud, prallten die Standpunkte mit unversöhnlicher Härte aufeinander. Luther klagte den Papst als jene Macht der Finsternis an, die jeden Christen einschließlich der Fürsten der Hölle zuführen wollte. Mit seiner Verurteilung würden sie sich also selbst um ihr Seelenheil bringen, ganz abgesehen davon, dass »Hab und Gut der edlen deutschen Nation durch eine unfassbare Tyrannei verschlungen worden sind und weiter verschlungen werden«. Als deutsche Männer mussten die Herrscher Luther, den aufrechten Deutschen, daher freisprechen und vielmehr den Papst als Verderber der deutschen Nation verdammen.

Dem römischen Nuntius Girolamo Aleandro stellte sich die Situation freilich genau umgekehrt dar, wie er in Briefen mitteilte. Für diesen hochgebildeten Humanisten, der unter anderem Lateinisch, Griechisch und Hebräisch

perfekt beherrschte, es aus abgrundtiefer Verachtung für die Deutschen aber ablehnte, deren Sprache zu erlernen, war Luther der Prototyp seiner barbarischen Nation. Umso bizarrer musste es auf den Gesandten wirken, dass Luther nicht in Ketten gelegt wurde, als er am zweiten Tag jeden Widerruf verweigerte: »Das ist nun wirklich der schiere Wahnsinn ... mit solchen himmelschreienden Unsinnigkeiten gewinnt dieses Ungeheuer die Dummen für sich.«

Zwar sprach Karl V. noch den Reichsbann aus, denn in der Tradition der Kaiser vor ihm sah er sich als Verteidiger der katholischen Kirche. Doch zu diesem Zeitpunkt war der Wittenberger, dem dank seines Kurfürsten freies Geleit zugesichert worden war, bereits abgereist. Ein auf Veranlassung seines Schutzherrn fingierter Überfall brachte ihn hinter den Mauern der Wartburg in Sicherheit.

Die wechselseitige Verteufelung dauerte Jahrhunderte. Sie begründete Kriege und schuf viel Leid, im Großen wie im Kleinen. Es ist erst wenige Jahrzehnte her, dass Ehen zwischen Katholiken und Protestanten von den jeweiligen Kirchen akzeptiert werden. Ob sich tatsächlich eine neue Ökumene abzeichnet, wie Christen beider Kirchen hoffen, wird nicht zuletzt das »Lutherjahr« 2017 zeigen. ◀

QUELLE

Reinhardt, V.: Luther der Ketzler. Rom und die Reformation. C.H.Beck, München, 3. Auflage 2017

1917

KRAFTPROTZ UNTER TAGE

»Die äußerst mühsame Arbeit des Schrämens wird heute im modernen Bergbaubetrieb im Gegensatz zur früheren Handarbeit fast nur noch maschinell ausgeführt. Die Demag-Schrämmaschine besteht im wesentlichen aus einer Stoßbohrmaschine, die durch eine besondere Vorrichtung in der Ebene des gewünschten Schrames [beziehungsweise Schlitzes] seitlich bewegt wird. Die Maschine, die sowohl an einer Säule befestigt, als auch auf einem Schlitten gelagert werden kann, eignet sich sowohl zum Schrämen wie zum Kerben

und Schlitzen und zum Herstellen von Keil- und Bohrlöchern. Infolge der äußerst einfachen und übersichtlichen Bauart ist die Handhabung der Maschine sehr einfach.«

Technische Monatshefte 8, S. 250



Die Anlage von Kerben und Schlitzen, das Schrämen, ist eine alte Bergbautechnik.

SCHWIMMENDE GIFTSPRITZEN

»Die sorgende Natur hat die Polypen wie auch ihre schwimmenden Nachkommen, die Quallen, mit höchst raffinierten Waffen versehen. Wenn kleine Tiere sich genähert haben, so werden sie von diesen dünnen Fäden nicht gepackt, sondern durch eine giftige Flüssigkeit gelähmt. An den Fangarmen sitzen zu diesem Zweck die Nesselzellen. [Sie] werden von einem ganz dünnen Körperhäutchen umspannt. Sobald dieses berührt wird, platzt es, und die Kapsel fliegt heraus. Zugleich streckt sich die nun entlastete Spiralfeder aus, dringt wie ein Spieß in das angegriffene Tier und lähmt es durch das ausfließende Gift.« *Prometheus 1450, S. 720*

TUBERKULOSE: ISOLIEREN UND VERNICHTEN

»Dr. Bergel vom Kaiser-Wilhelm-Institut für experimentelle Heilkunde hat zu entscheiden versucht, welche Vorgänge bei der Selbstheilung der Tuberkulose eine Rolle spielen, und gefunden, daß die Lymphozyten, die ein fettspaltendes Ferment absondern, als wesentliche Ursache in Frage kommen. [Sie] sind imstande, die Fetthülle der Bazillen abzuschmelzen und zu verdauen. Unser Körper benutzt die Waffe im Kampfe gegen den furchtbaren Feind u. a. in der Weise, daß er um den Tuberkelherd herum eine Art Wall aus Lymphozyten bildet und so eine Zone schafft, die die Bazillen isoliert und vernichtet.« *Die Umschau 34, S. 648*

1967



Felsmalerei aus dem Tassili-Hochland.

GRENZENLOSE FELSMALEREI

»Die Annahme einiger Forscher, daß während des Neolithikums entlang der westlichen Steilhänge des Tassili-Gebirges, die durch ihre Höhe und Unwegsam-

keit eine Landschaftsgrenze darstellen, eine kulturelle Grenze verlaufen sei, kann nicht aufrechterhalten werden. Wohl den letzten schlüssigen Beweis hierzu bilden die Felsbilder in Tahort, einem Fundplatz in rd. 50 km Entfernung westlich von Djanet. Deutlich zeigt sich eine Übereinstimmung des in Bildern [von Tahort und aus dem Hochland] dargestellten Menschentypus. In beiden Fällen handelt es sich um in roter Farbe gemalte Männer im Keilstil: breite Schultern und sehr enge Taille.« *Die Umschau 16, S. 532*

GEFÄHRLICHE RINGE

»Zyklische Stränge von DNS wurden bereits in elektronenoptischen Bildern von Bakterien und Viren beobachtet. Dieses Molekül dürfte [beim Polyomvirus] kaum Platz für mehr als zehn Erbanlagen bieten. Die große Stabilität, die es seiner Form verdankt, macht es zu einem Modellfall für erbbiologische Untersuchungen. Dazu kommt, daß das Polyomvirus multiple Tumoren verursacht. Andere Viren mit zyklischer DNS verursachen ebenfalls Tumoren, die allerdings nicht maligne sein müssen, wie die Warzen des Menschen.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 8, S. 336*

VORSICHT, SPINAT!

»Auf älteren Lebensmitteltabellen wird Spinat ein hoher Gehalt an Eisen zugeschrieben. Diese Angaben gehen auf eine fehlerhafte Berichterstattung aus dem vorigen Jahrhundert zurück. Neuere Untersuchungen stellen fest, daß der Genuß in großen Mengen vor allem bei Kindern schädlich ist. Das Gemüse enthält viel Oxalsäure, eine organische Säure, die mit Calcium eine unlösliche und daher nicht verwertbare Verbindung bildet. Wenn gerade Kinder Spinat nicht essen, so sollte man darin eine Abwehrreaktion sehen, die biologisch zweckmäßig ist.« *Kosmos 8, S. 256*

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

Ab 21. 7. 2017 bei Ihrem
Zeitschriftenhändler!

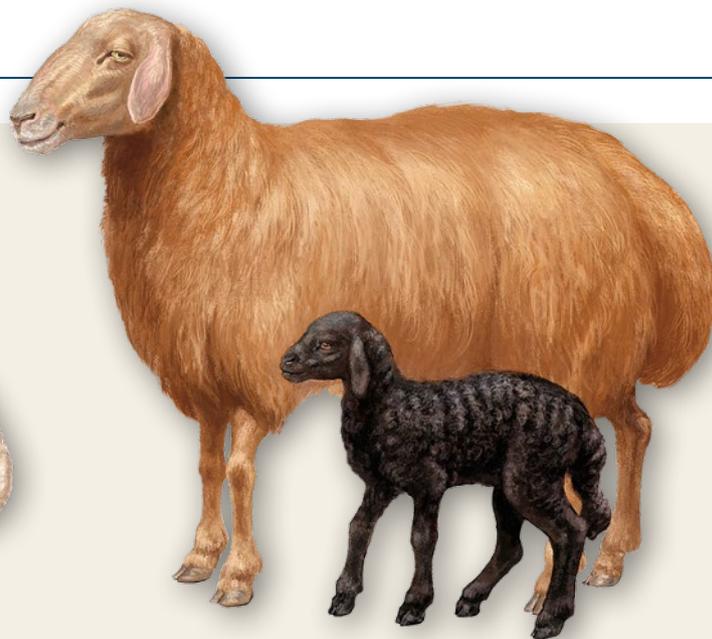


Print | 5,90 €
Download | 4,99 €

www.spektrum.de/aktion/urknall

REZENSIONEN

Das Merinolandschaf, auch »Württemberger«, ist der Allrounder schlechthin, da es gute Wolle liefert, fruchtbar und marschfähig ist und schnell Fleisch ansetzt.



Karakulschafe waren ursprünglich in den zentralasiatischen Steppen zu Hause. Von den Lämmern stammen die berühmten Persianerfelle.

FALK NORDMANN, AUS ECKHARD FUHR: SCHAFE, MIT FROL. GEN. DES VERLAGS MATTHES & SEITZ, BERLIN

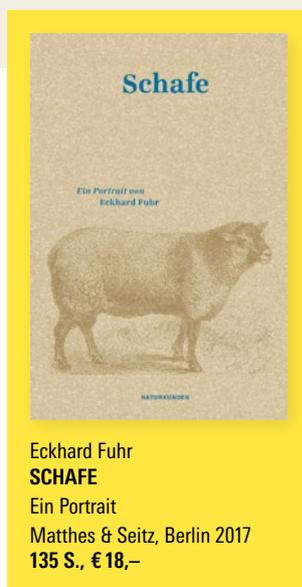
TIERHALTUNG MIT HÖRNERN, KLAUEN UND VLIES

Mensch und Schaf leben seit Jahrtausenden miteinander – eine wechselhafte Kulturgeschichte, zu der auch der Hund gehört.

► Eine weidende Schafherde im Tal; daneben der Schäfer, lässig auf seine Schippe gelehnt und flankiert von seinen Hunden: Es gibt kaum einen friedlicheren Anblick. Wer kann sich heute vorstellen, dass dieses Bild einmal für Not und Zerstörung stand? Vom Mittelalter an protegierte der europäische Adel die Schafzucht; man wollte am wachsenden Geschäft mit der Wolle teilhaben.

Herdenbesitzer und Agrarunternehmer erhielten weit reichende Weiderechte, die sie rücksichtslos gegen Ackerbauern durchsetzten. Menschen wurden von ihrem Land verjagt, bäuerliche Existenzen ausgelöscht; Humanist Thomas Morus (um 1478–1535) schrieb von »menschenfressenden Schafen«. Im schottischen Hochland vertrieben Gutsherren die ansässige Bevölkerung, um Platz für die Herden zu schaffen, was als »Highland Clearances« in Erinnerung geblieben ist. So wie später die Maschinenstürmer gegen Fabriken gingen die Bauern vielerorts gewaltlos gegen Schafherden vor und töteten zehntausende Tiere.

Dies alles erfahren die Leser im vorliegenden Büchlein, geschrieben vom Journalisten und passio-

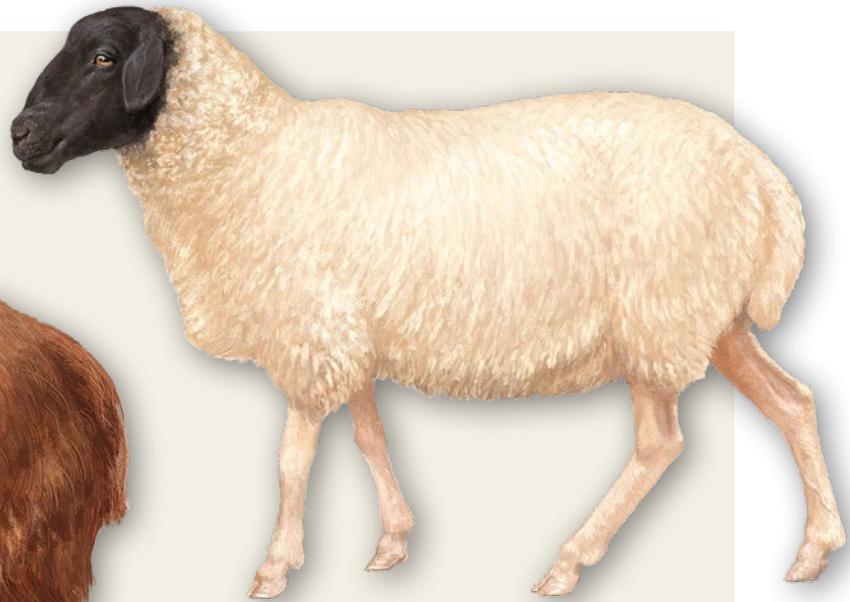


Eckhard Fuhr
SCHAFE
Ein Portrait
Matthes & Seitz, Berlin 2017
135 S., € 18,-

nierten Jäger Eckhard Fuhr. Der Autor hat ein interessantes Werk rund um Schafe vorgelegt, in dem er die Geschichte der Schafwirtschaft behandelt, verschiedene Rassen vorstellt, auf deren Zucht eingeht, die Rezeption dieser Tiere in Kunst und Religion beleuchtet und einen Blick auf den heutigen Stand der Schäferei wirft.

Urbane Menschen, die »in größter Ferne zu Ackerbau und Viehzucht« leben, wie es in dem Band heißt, lernen bei der Lektüre Erstaunliches. Etwa darüber, was Hütehunde können. Sie treiben ihre Herde auf engen Wegen voran, schaffen Platz für entgegenkommende Fahrzeuge, halten die Schafe auf schmalen Landstreifen beieinander oder lassen sie ins »weite Gehüt« auschwärmen. Versucht ein Tier, das zugewiesene Areal zu verlassen, ahndet der Hund das, wobei er sich gelegentlich mit einem kniefenden Biss Respekt verschafft. Dies, erläutert der Autor, sei sehr wichtig in einer klein parzellierten Kulturlandschaft, in der sich Schäfer streng an die Landmarken des Ackerbaus halten müssen. Auf dem einen Flurstück sollen die

Die Schafrasse Navajo-Churro wurde vom nordamerikanischen Volk der Navajo gezüchtet.



Charakteristisch für das Rhönschaf ist der schwarze Kopf bei sonst weißem Körper. Es ist eine landschaftstypische Nutzierrasse der Rhön.

FALK NORDMANN, AUS ECKHARD FUHR: SCHAFE; MIT FRÖL, GEN. DES VERLAGS MATTHES & SEITZ, BERLIN

Tiere ihren Dung abwerfen, auf dem anderen direkt daneben aber die frisch grünende Wintersaat in Ruhe lassen.

Besonders bedeutsam sind solche Fähigkeiten für die »Transhumanz«, eine traditionelle Form der Schafwirtschaft. Hier führen Hirten ihre Herden auf manchmal hunderte Kilometer langen Wanderwegen, Triften genannt, zwischen Sommer- und Winterweiden hin und her – vorbei an Ackerland und bewohntem Gebiet. Dabei sei es immer wieder zu Rechtsstreitigkeiten mit Ackerbauern gekommen, erzählt Fuhr. Heute würden in Frankreich, Spanien und Italien die alten Transhumanz-Traditionen wiederbelebt, hofiert von der Politik. Auch in Deutschland interessierten sich etliche für den Schäferbe-

ruf, unter ihnen viele junge Frauen.

Zu den Herausforderungen, vor denen Schäfer heute stehen, gehört die »Rückkehr der Wölfe«, wie der Autor darlegt, der 2016 ein gleichnamiges Buch veröffentlicht hat. 2015 seien in Deutschland rund 350 Weidetiere den Räubern zum Opfer gefallen (behördliche Angaben bestätigen diese Größenordnung). Das seien zwar nicht viele, gemessen daran, dass allein im Mercantour-Nationalpark in den französischen Alpen jährlich mehrere tausend Schafe von Wölfen gerissen werden. Doch rechnen müssten Schafhalter mit Wolfsübergriffen von nun an immer.

Die Halter stellen sich darauf ein, indem sie beispielsweise Zäune errichten und Schutzhunde wie

Patous anschaffen. Diese verteidigen die Herde gegen jeden Fremden, der sich aufdringlich nähert – auch gegen Menschen. Doch nicht überall reichten Herdenschutzhunde und Elektrozaune aus, um eine erträgliche Koexistenz von Wolf und Schäferie zu erreichen, betont Fuhr. Vor allem in der extensiven Weidewirtschaft, etwa im Hochgebirge, sei es geboten, auf die Rückkehr des Wolfs mit einem Comeback der Hirten zu reagieren.

Etliche Leser dürfte erstaunen, wie viele Rassen des Hausschafs (*Ovis gmelini aries*) es gibt: weltweit mehrere hundert. Elf davon stellt Fuhr in kurzen Porträts vor, vom Navajo-Churro über die Heidschnucke bis zum Kamerunschaf, das nicht geschoren werden muss (Schafwolle bringt weithin keine Erlöse

mehr). Hervorgegangen ist das Hausschaf vermutlich aus Wildschafspezies, die wir heute als Mufflons bezeichnen.

Schafe haben eine große religiöse Bedeutung, auf die der Autor in einem gesonderten Abschnitt eingeht. Hier befasst er sich unter anderem mit dem biblischen Opferlamm – ein Exkurs, der sicher nicht allen zusagt.

Das Buch überzeugt als interessantes Porträt jener Tiere, deren Anwesenheit in der Kulturlandschaft viele gedankenlos hinnehmen. Ansprechend ist nicht nur der Inhalt, sondern auch die edle Gestaltung, einschließlich der schönen Bebilderung in Form von historischen Gemälden, Zeichnungen und Fotos.

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

ESOTERIK GESPENSTISCHE QUANTEN

Eine Schriftstellerin mit Jenseitserfahrung verführt einen Quantenphysiker dazu, ihren wilden Spekulationen nicht hinreichend deutlich zu widersprechen.

Die Quantenwelt ist unanschaulich. Sie lässt sich mathematisch exakt beschreiben, übersteigt aber die Grenzen unserer Umgangssprache, die sich zuvorderst auf Alltagsobjekte bezieht. Wenn Naturforscher und Philosophen etwas über Quanten erzählen, sind sie deshalb auf Metaphern angewiesen, hinter denen sich aber zumeist eine präzise mathematische Bedeutung verbirgt.

Dennoch regen Formulierungen wie »Unbestimmtheit«, »Komplementarität«, »Verschränkung« oder



Lotte Ingrisch, Helmut Rauch
DER QUANTENGOTT
Dialog über eine
Physik des Jenseits
Nymphenburger, München 2017
224 S., € 20,-

licher Wirbelwind durch die österreichische Kulturlandschaft. Als Expertin für Tod und Jenseits behauptet sie steif und fest, regelmäßig mit Gespenstern zu verkehren und sich gelegentlich in eins zu verlieben.

Koautor Helmut Rauch übernimmt den undank-

esoterische Gedankenwelt zu kreisen. Wie das Buch dokumentiert, versuchte er anfangs noch, Schrödingers Katze vor Ingrischs Zugriff zu retten – indem er bezweifelte, das berühmte Gedankenexperiment beweise, dass Diesseits und Jenseits ein und dasselbe seien.

Doch offenbar konnte Rauch dem Sog des ingrischischen Mahlstroms letztlich nicht widerstehen. Im Schlusskapitel »Was kann der Quantengott?« übernimmt er die esoterische Wortwahl seiner Koautorin und meint, die Quantenphysik liefere eine naturwissenschaftliche Beschreibung für eine »Reihe mystischer und transzendenter Phänomene, die dem normalen Menschenverstand unerklärlich erscheinen«. Er zählt dann als Beispiele lauter typische Quantenphänomene auf, von denen allerdings keines mystisch, transzendent oder unerklärlich ist. Sie lassen sich samt und sonders erklären, nur sind die Erklärungen eben unanschaulich.

Man kann sich je nach Laune amüsieren oder ärgern über dieses Buch, das ultimativ mit Quantenvokabeln spielt. Ein bisschen lustiger und abwechslungsreicher wäre es in diesem thematischen Zusammenhang, wenn in Umkehr der Geschlechterstereotype einmal ein Mann die Rolle des gefühlsseligen Wirrkopfs übernehme und eine Frau die Vernünftigere gäbe.

Michael Springer ist Physiker, Schriftsteller und Wissenschaftsredakteur sowie Autor der Kolumne »Springers Einwüf«.«

EPIGENETIK UMWELT UND ERBGUT

Epigenetische Modifikationen beeinflussen die Gesundheit, vermutlich sogar über Generationengrenzen hinweg.

Gesundheit ist ein fortwährender Prozess: So lautet die Kernaussage von Peter Sporks neuestem Band. Der Hamburger Neurobiologe, Wissenschaftsjournalist und versierte Sachbuchautor hat hier aktuelle Forschungsergebnisse an der Schnittstelle von Biomedizin und Grundlagenforschung zusammengetragen. Dabei ist eine sehr umfangreiche Übersicht über jene epigenetischen Prozesse herausgekommen, die uns bereits lange vor der Geburt zu prägen beginnen und dies zeitlebens weiter tun. Sie dokumentieren unsere Lebensweise auf molekular- und zellbiologischer Ebene – möglicherweise sogar über Generationengrenzen hinweg. Ohne wissenschaftliche Sachverhalte zu sehr zu vereinfachen, schafft es Spork scheinbar mühelos, die zu Grunde liegenden komplexen Zusammenhänge einem breiten Publikum zugänglich zu machen. Allerdings möchte er sein Buch explizit nicht als Ratgeber verstanden wissen.

Der Autor stellt uns die epigenetischen Komponenten unserer Gesundheit in drei größeren Abschnitten vor. Im ersten thematisiert er, wie sich Erfahrungen, die wir im Lauf unseres Lebens machen, auf unser Risiko für Volkskrankheiten

Wer über Quanten erzählt, kommt um Metaphern nicht herum – und die regen unweigerlich die Fantasie an

»spukhafte Fernwirkung« unweigerlich die Fantasie dazu an, auf mehr oder weniger dumme Gedanken zu kommen. Das vorliegende Buch lässt schon im Titel keinen Zweifel daran, dass hier alle Hemmungen fallen und das freie Assoziieren fröhliche Urständ feiert.

Die zwei Autoren bilden eine explosive Mischung. Lotte Ingrisch feigt seit Jahrzehnten als unermüd-

baren Gegenpart des Stichwortgebers. Der in Fachkreisen angesehene Experimentalphysiker konnte 1974 durch Doppelspaltversuche mit Neutronen erstmals beweisen, dass Kernteilchen Wellencharakter besitzen, wie von der Quantenmechanik verlangt. Auf seine alten Tage geriet Rauch nun in Ingrischs Anziehungsbereich und begann, in einer immer engeren Spiralbahn um ihre



wie Krebs oder Demenz auswirken. Dabei wird klar,

dass die Gene hierfür zwar eine wichtige Rolle spielen – ebenso bedeutsam aber deren Aktivierbarkeit ist, die epigenetisch reguliert wird. Eine zentrale Aussage in diesem Kontext lautet, dass wir unsere Gesundheit zeitlebens positiv beeinflussen können, wenn wir es schaffen, unsere Lebensweise langfristig zu ändern. Etwa durch vermehrte körperliche Aktivität, gesündere Ernährung oder Stressvermeidung. Denn, so zitiert Spork den Direktor des Freiburger MPIs für Immunbiologie und Epigenetik Thomas Jenuwein: »Die Epigenetik können wir verändern. Epigenetische Markierungen sind potenziell reversibel.«

Abschnitt zwei handelt von »sensiblen Phasen«. Lange bekannt ist etwa, dass während der Schwangerschaft vieles richtig, aber eben auch falsch laufen kann. Schaut man

schon drei Monate vor der Empfängnis können Umwelteinflüsse die spätere Entwicklung des Kindes beeinflussen, wie aktuelle Untersuchungen ergeben haben. Somit käme auch

Väter prägen ihre Kinder vermutlich auch epigenetisch

sich die Studienlage genauer an, ist dieser Teil der pränatalen Prägung aber nur ein Aspekt von mehreren. Zwar verbringt jeder Mensch die ersten neun Lebensmonate im Mutterleib – das bedeutet aber nicht, dass ausschließlich die Mutter für das Kind verantwortlich ist. Denn

dem Vater eine wichtige Rolle zu. Die Hinweise verdichten sich, wonach spezielle Nukleinsäuren in den Spermien, die so genannten microRNAs, Umwelteinflüsse an den Nachwuchs vermitteln, denen der Vater vor der Zeugung ausgesetzt war. Dies würde die Nachkom-

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

REZENSIONEN

men bestmöglich auf die zu erwartende Umwelt vorbereiten, schreibt Spork. Allerdings räumt er ein, dass ein Großteil dieser Studienergebnisse bislang nur am Mausmodell ge-

Umwelterfahrungen können sich sogar auf die Enkel auswirken

zeigt werden konnte, wenn gleich immer mehr für deren Übertragbarkeit auf den Menschen spreche. Den Einfluss der Mutter und ihrer Umwelt nimmt der Autor ausgiebig in einem eigenen Kapitel unter die Lupe.

Im letzten Buchabschnitt lotet Spork mit dem Thema der generationsübergreifenden Epigenetik die Grenzen unseres derzeitigen Wissens aus. Von Nagern ist bekannt, dass sich Umwelterfahrungen der Eltern auf die Kinder und sogar Enkel auswirken können. Wie dies molekularbiologisch vonstattengeht, erläutert der Autor anhand zahlreicher Studien. Dass derartige Effekte auch beim Menschen zum Tragen kommen, zeigen Untersuchungen an Holocaustüberlebenden und deren Kindern. Erstere haben durch epigenetische Modifikationen, die von ihrer unvorstellbaren Traumatisierung herrühren, eine zeit lebens erhöhte Stresstoleranz. Ihre Kinder besitzen ebensolche Modifikationen, die aber in die entgegengesetzte Richtung wirken und sie dadurch stressanfälliger machen, so der Autor. Zahlreiche weitere epidemiologische Studien legen ihm zufolge nahe,

dass generationsübergreifende epigenetische Vererbung bei Menschen ebenso eine Rolle spielt wie bei den Nagern. Noch, konstatiert Spork übereinstimmend mit kritischen Wissenschaft-

lern, sei die Datenlage allerdings etwas zu wackelig, um daraus endgültige Schlüsse zu ziehen.

Der Autor beschreibt mit diesem Sachbuch neu entdeckte Prinzipien der Epigenetik, die unsere Gesundheit betreffen, an gut untersuchten Beispielen. Er arbeitet dabei den Zusammenhang von sozialen und biologischen Prozessen heraus und hat die

Studienlage nebst Sekundärliteratur hervorragend im Blick. Spork lässt Kritiker ebenso wie Befürworter zur Sprache kommen und macht trotzdem deutlich, weshalb er eindeutig zu Letzteren gehört. Das verleiht seinem Werk Substanz und Glaubwürdigkeit. Eine Prise Humor und persönliche Anekdoten runden das interessante und hochaktuelle Werk elegant ab. An Stellen, die für das Verständnis kritisch sind, enthält das Buch gut aufgearbeitete Grafiken, zudem bietet es ein umfangreiches Glossar zum Nachschauen von Fachbegriffen. Besonders interessierte Leser finden im Literaturverzeichnis etliche Anregungen, um sich weiterzubilden.

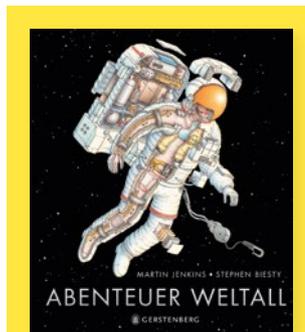
Arne Baudach ist Doktorand der Biologie in Gießen.

ALTES ÄGYPTEN BESTÄNDIGKEIT IN DER WÜSTE

Dieser reich bebilderte Ausstellungsband erläutert, wie aus dem Naturraum Ägypten ein Kulturraum wurde.

Keine Hochkultur des Altertums fasziniert die Nachwelt so sehr wie das pharaonische Ägypten. Weltweit verbuchten Museen Besucherrekorde, avancieren Ausstellungen zu Publikumsmagneten. Dies gilt auch für die Erlebnisschau »Pharao«, die seit März 2017 ihre Pforten im Loksuppen Rosenheim geöffnet hat (bis Dezember 2017). Interessant ist ihre Konzeption, die durch Zusammenführen von Bau- und Sozialgeschichte die Gesellschaft Ägyptens

RAUMFAHRT HIGHTECH ZEICHNEN OHNE LINEAL



Martin Jenkins, Stephen Biesty
ABENTEUER WELTALL
Gerstenberg, Hildesheim 2017
64 S., € 16,95

Ein Bildband über Weltraumtechnik für Kinder und Jugendliche.

Dieses Kinder- und Jugendbuch könnte auch anders heißen: Abenteuer Technik. Denn die detailverliebten, seitenübergreifenden Zeichnungen von Weltraumtechnik machen das Werk besonders – seien es die größte Rakete der Welt im Kennedy Space Center oder der Raumanzug mit isolierender Zehenklappe, Trinkbeutel und einzeln beheizten Fingerlingen. Die Bilder des britischen Illustrators Stephen Biesty verleiten den Leser zum genauen Hinsehen und Entdecken; Biesty verzichtet beim Anfertigen seiner Grafiken übrigens auf technische Hilfsmittel wie Computer und benutzt nicht einmal ein Lineal. Autor Martin Jenkins liefert dazu einen schnörkellos sachlichen, aber kurz-

weiligen Text, der von antiken Himmelsbeobachtungen, Weltraummissionen und Satelliten handelt, aber auch von Zukunftsvisionen wie einer Station auf dem Mars. Auf 64 Seiten bringt der Band eine hohe Faktendichte mit sich und gibt einen gelungenen Einblick in das Thema Weltraumtechnik. Ein empfehlenswertes Werk für Einsteiger. Theresa Moebus



Christian Tietze (Hg.)

PHARAO

Leben im Alten Ägypten
Philipp von Zabern,
Darmstadt 2017
295 S., € 32,-

»in neuer Weise lebendig werden lassen will«. Dieses komplexe Gefüge von Architektur und sozialen Strukturen beleuchtet der vorliegende Begleitband zur Ausstellung in erhellenden Beiträgen.

Im Vordergrund des Werks steht der Raum als Handlungsort, in dem Menschen auf unterschiedlichste Weise miteinander interagieren. Deutlich spürt man dabei die Handschrift von Christian Tietze, Ausstellungskurator und Herausgeber des Bands, der nicht nur grabungserfahrener Archäologe, sondern zugleich versierter Architekt und Ingenieur ist.

Das erste Kapitel »Landschaftsräume« behandelt die naturgeografischen Faktoren, die Ägypten prägen. Umgeben von Wüsten, war das Land jahrhundertlang vor Invasoren und auch Fremdeinflüssen von außen geschützt, was zu einer stabilen Entwicklung im Innern beitrug. Daneben sorgte der Nil, der einen rund 1000 Kilometer langen Grünstreifen in die karge Wüstenlandschaft gräbt, für Fruchtbarkeit. Die Ägypter priesen »Hapi«, die göttliche Verkör-

perung des Nils, als Heilsbringer, der alljährlich über die Ufer trat und bis zu 21 Kilometer breite Streifen beiderseits des Flusses mit fruchtbarem schwarzen Schlamm überzog. Nach ihm benannten die Ägypter ihr Land: »Kemet«, das Schwarze.

Anschaulich zeigt das Buch auf, wie aus dem Naturraum Ägypten ein Kulturraum wurde. Der berechenbare Kreislauf der Natur ermöglichte die Urbarmachung des Lands: Ein komplexes, aus Erdwällen und Kanälen bestehendes Bewässerungssystem sorgte dafür, dass das Nilhochwasser auf die Felder gelangte und im Niltal blühende Landschaften entstanden.

Am deutlichsten zeigt sich der Übergang von der Ackerbaugesellschaft zur Hochkultur in der Architektur. Anfangs aus Lehmziegeln, ab 2700 v. Chr. aus Stein, errichteten die Ägypter Bauwerke, mit denen sie, gegen die Zeit aufbegehrend, Monumente für die Ewigkeit schufen. Zunächst als Mastaba (arabisch für Steinbank), später als Pyramide entstanden weithin sichtbare Grabanlagen für die Könige und Königinnen als Wohnstätten im Jenseits.

Lebensräume im Diesseits, »in denen Menschen ihr Zusammensein organisieren«, beleuchten die Autoren aus unterschiedlichen Perspektiven und anhand diverser Architekturen. Prächtig ausgestattete Tempel und Paläste werden dabei ebenso vorgestellt wie simple Wohnhäuser der Unterschicht oder Unterkünfte der Arbeitersiedlungen, die durch zahlreiche Grundrisse und Modelle erläutert und veranschau-

Warum sind wir so,
wie wir sind?

Was ist in der Familie
angelegt?

Was können wir selbst
bestimmen?

Foto: Deborah Feingold



Der »New York Times«-Nr.1-
Bestseller des Pulitzerpreisträgers
Siddhartha Mukherjee



REZENSIONEN

licht werden. Die Autoren unterscheiden dabei zwischen nichtöffentlichen (Tempel, Paläste, Wohnanlagen) und öffentlichen Räumen (Plätze, Straßen, Vorhöfe der Tempel, Alleen, Ufer und Prozessionswege), auf denen sich die Menschen bewegten, arbeiteten, agierten und gemeinsam feierten.

Als Orte der Gemeinschaft kommt vor allem den Letzteren eine wichtige integrierende Funktion für die Gesellschaft zu. Zum Beispiel im Zusammenhang mit Festen und Thronjubiläen, an denen die Menschen regelmäßig zusammenkamen und die deshalb besonders stark identitätsstiftend waren. Hierzu zählt das Sedfest, auch Erneuerungsfest genannt, an dem die Bevölkerung Ägyptens miterlebte, wie die magischen Schöpfungskräfte des Königs, die sich im Lauf einer langen Regierungstätigkeit abgenutzt hatten, rituell erneuert wurden.

Darüber hinaus erfahren die Leser allerlei Wissenswertes über den Alltag der Ägypter, über Landwirtschaft und Vorratshaltung, Götterwelt und Totenkult – und über die Institution des ägyptischen Königtums, dessen Amtsinhaber als Einziger in der Lage schien, kultisch mit den Göttern zu kommunizieren und so die weltliche und kosmische Ordnung des Landes zu bewahren. Das war auch der wesentliche Grund dafür, warum das Königtum in Ägypten mehr als dreieinhalb Jahrtausende lang niemals in Frage gestellt wurde.

Die Autoren zeichnen ein sehr bildhaftes und facettenreiches Gesamtbild einer hoch entwickelten Gesellschaft, in der vor mehr als 5000 Jahren der erste Zentralstaat der Weltgeschichte entstand.

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

EVOLUTION ENERGETISCHE BEGRENZUNGEN ÜBERWINDEN

Ein Biochemiker stellt eine bestechende These zur zellulären Evolution vor.

Es ist ein bisschen wie ein guter, alter Krimi: Im vorliegenden Buch wirft Autor Nick Lane ein großes Rätsel auf, fügt langsam Puzzleteil um Puzzleteil zusammen, und am Ende ergibt jeder Aspekt der Geschichte einen Sinn. Die Geschichte, das ist in diesem Fall die Evolution des Lebens. Anders als ein Krimi ist das Werk des britischen Biochemikers nicht immer leicht zu lesen, zu komplex sind die Materie und zu zahlreich die Fachgebiete, in die er vorstößt. Doch für die These, die der Autor entwickelt, lohnt der Einsatz: Sie zeichnet ein neues und verblüffend

plausibles Bild der Evolution, das sich auf Energie statt Information gründet.

Lane beginnt seine Überlegungen mit dem Ursprung eukaryotischer Zellen, die einen echten Kern besitzen und reich kompartimentiert sind, und fragt, weshalb diese in Milliarden Jahren Erdge-



Nick Lane
DER FUNKE DES LEBENS
Energie und Evolution
Aus dem Englischen von
Monika Niehaus, Martina Wiese
und Jorunn Wissmann
Theiss, Darmstadt 2017
384 S., € 29,95

GESCHICHTE IM FAHRWASSER DER WILDEN MÄNNER

Reiseführer für Wikingerbegeisterte

Wo kann man heute auf den Spuren der Wikinger wandeln? Umfassende Antworten darauf liefert der vorliegende Reiseführer – und das äußerst informativ und gut recherchiert. Beginnend an der historischen Wikingersiedlung Haithabu (beim heutigen Schleswig) führt der Weg, mit einem kurzen Abstecher nach Mecklenburg-Vorpommern, gen Norden. Der Schwerpunkt liegt auf Schleswig-Holstein und den dänischen Inseln; dort kann man zahlreiche archäologische Überreste bis heute in der Landschaft ausmachen. Weiter geht es nach Schweden,



Barbara Post, Stefan Lipsky
FASZINATION WIKINGER
Ein Reiseführer
Theiss, Darmstadt 2017
184 S., € 22,-

wo sich viele Spuren des regen Warenaustauschs der Wikinger bis weit in den Osten finden. In Norwegen bestimmen Schiffsfunde das Bild; herausragendes Beispiel ist das Gokstad-Schiff aus dem Sandefjord, das heute in Oslo ausgestellt wird. Die Tour führt sogar bis zum Polarkreis: Auf der Lofoten-Insel Vestvågøy befindet sich mit 83 Metern das längste bisher bekannte Gebäude der Wikingerzeit.

Der Reiseführer beleuchtet historische Entwicklungen und geht auf die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Spuren der Nordmänner ein. Zudem beschreibt er anschaulich, was die jeweiligen Museen beziehungsweise archäologischen Stätten zu bieten haben, und weist auf einschlägige Veranstaltungen hin. Wer sich

auf die Spuren der kriegerischen Seefahrer begeben möchte, ist mit dem Werk gut gewappnet. Bernadett Fischer

schichte nur einmal entstanden sind (alle Pilze, Pflanzen und Tiere einschließlich des Menschen haben eine einzige Zelle als gemeinsamen Vorfahren). Auch geht der Autor der Frage nach, weshalb prokaryotische – also keinen Kern besitzende – Zellen, nämlich Bakterien und Archaeen, niemals auch nur annähernd die Komplexität der Eukaryoten entwickelt haben. Der Schlüssel liegt für Lane in der Energieversorgung, die bei fast allen Zellen dieselbe chemische Grundlage hat: den Protonengradienten der Atmungskette.

Der Autor legt schlüssig dar, wie in basischen hydrothermalen Schloten der jungen Erde chemische Prozesse zwingend dazu führen mussten, dass erste Zellen entstanden – die Anfänge des Lebens. Auch zeigt er, wieso prokaryotische Zellen einer energetischen Limitierung unterliegen, die sie daran hindert, jemals vergleichbar viele Gene und damit eine ähnliche Komplexität wie Eukaryoten zu entwickeln. Lane argumentiert plausibel, wie dieses Limit überwunden werden kann, indem ein Archaeon und ein Bakterium eine Endosymbiose eingehen, also zu einem Zelltyp verschmelzen, aus dem später Eukaryoten hervorgehen können.

Von hier ausgehend beantwortet der Wissenschaftler wesentliche Fragen der Biologie: weshalb Eukaryoten einen Zellkern haben, sich fast immer sexuell vermehren, und was die Lebenserwartung einer Spezies determiniert. Das klingt nur so lange weit hergeholt, bis

der Biochemiker seine Argumente vollständig vorgetragen hat. Dann erscheint es dermaßen schlüssig, dass man sich fragt, warum über entsprechende Thesen nicht viel mehr gesprochen wird.

Lane macht stets deutlich, wo er sich auf etabliertes Wissen und wo auf strittige Thesen stützt, welches seine eigenen Überlegungen sind und welche Belege sein Team dafür experimentell bereits erbringen konnte. Mit gut eingeführten Fachbegriffen und einem umfangreichen Glossar hilft er den wenig vorgebildeten Lesern, sich die Materie zu erschließen, und mit zahlreichen Referenzen gibt er dem fachlich versierten Publikum die Möglichkeit, seine Thesen vertiefend zu prüfen.

»Der Funke des Lebens« ist zwar noch viele Experimente davon entfernt, als wahrscheinlichste Theorie des Lebens anerkannt zu werden. Es erscheint jedoch dermaßen stimmig, dass es schwerfällt, dem Charme der vorgestellten These nicht zu erliegen. Nicht zuletzt, weil Forscher 2010 in einem hydrothermalen Schlot einen Zelltyp entdeckt haben, der in vielerlei Hinsicht dem entspricht, was man sich unter einem »Missing Link« zwischen Prokaryoten und Eukaryoten vorstellt, und Lanes Theorie in vielen Punkten zu bestätigen scheint. Das Buch ist anspruchsvoll, aber der Lesemühe wert – und könnte sich als bahnbrechend erweisen.

Björn Lohmann ist Wissenschaftsjournalist in Wesel mit Schwerpunkten in den Lebens- und Umweltwissenschaften.

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), Robert Gast, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Kordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Sibylle Franz, 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: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg

Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Dirk Gassmann, Dr. Eva Gottfried, Dr. Ursula Loos, Dr. Andreas Nestke, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Gesamtbereichsleitung: Michael Zehntmaier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887 97-8550; Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg, Tel. 040 3280-189

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 38 vom 1.1. 2017.

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 nächstehenden 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: © 2017 (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.



LESERBRIEFE

SIND JUPITER UND DIE ERDE AUCH KEINE PLANETEN?

Die 2006 beschlossene Einstufung Plutos als Zwergplanet hält Florian Freistetter nach wie vor für richtig. (»Plutos Degradierung«, Freistetters Formelwelt, *Spektrum* Juni 2017, S. 85)

Peter Rottengatter, per E-Mail: Ich stimme zu, dass der Status »Planet« nicht an der Form und dem Material festgemacht werden sollte. Die offizielle Definition ist besser, jedoch leider auch nicht unproblematisch. Das Problem hängt an »alles Material eingesammelt hat«. Natürlich muss Material, das auf das Objekt fällt, als eingesammelt gelten; für das der Monde muss man das Wort schon dehnen. Was aber ist mit Jupiters Trojanern oder im Fall der Erde mit Asteroid Cruithne? In beiden Fällen handelt es sich um Material, für das die Gravitation der Sonne die des Planeten überwiegt, und das daher koorbital, und damit in der Umgebung des Planeten, die Sonne umläuft. Dass zum Beispiel Jupiters Gravitation die Trojanerbahn beeinflusst, darf keine Rolle spielen, denn das tut sie auch mit der Saturnbahn (und umgekehrt).

Herr Freistetter hat korrekt erkannt: »Eine klare Trennlinie gibt es nicht. Die Übergänge sind fließend.« Konsequenterweise muss man dann eine zugegebenermaßen künstliche Grenze ziehen. Mein Vorschlag lautet etwa so: Ein Objekt darf sich Planet nennen, wenn es von der Gesamtmasse aller Objekte, deren Umlaufperiode um die Sonne um weniger als 10 Prozent von der des Kandidaten abweicht, mehr als 90 Prozent auf sich konzentriert. Mit dieser Definition hat das Sonnensystem ohne Diskussion die bekannten acht Planeten, nicht weniger und nicht mehr.

TRICKKNOTEN FÜR DIE HÄNGEMATTE

Warum sich manche gebundenen Schleifen wieder lösen, erläutert Hans J. Schlichting. (»Wenn Schnürsenkel versagen«, Schlichting!, *Spektrum* Juli 2017, S. 70)

Klaus Gims, Holzkirchen: Der Artikel ist informativ, kurios, aber leider unvollständig. Es fehlt der Rauschknoten. Während das untere Bild auf S. 71 eindeutig einen Altweiberknoten oder Großmutterstek darstellt, kann das obere Bild sowohl ein Rauschknoten als auch ein echter Kreuzknoten sein. Beide unterscheiden sich nur an den so genannten losen Parten – also den Enden. Liegen beide oben oder unten, so ist es ein echter Kreuzknoten. Ist jeweils eines der Enden oben, das andere unten, so handelt es sich um einen Rauschknoten.

Der Rauschknoten springt nach wenigen ruckartigen Lastwechseln sofort auf. Er ist unsicherer als der Groß-

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an leserbriefe@spektrum.de. Oder kommentieren Sie im Internet auf Spektrum.de direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht.

mutterstek, sieht dem echten Kreuzknoten allerdings noch ähnlicher. Der Erzählung nach sollen die Fahrenleute auf den Großseglern die Hängematten der Seekadetten mit einem Rauschknoten an Stelle des Kreuzknotens angebunden haben. Wer dann einmal mit seiner Hängematte auf den harten Schiffsplanken gelandet ist, wird diese Knoten sein Leben lang sicher unterscheiden können. Eine etwas rüde Art, Knotenkunde zu vermitteln. Während der Schnürsenkel beidseitig auf Slip gelegt wird, binden die Segler ihre Reffbändsel mit einem einseitig auf Slip gesetzten Kreuzknoten. Das erhöht dessen Festigkeit, ohne ein leichtes Öffnen zu erschweren.

Die Festigkeit eines Kreuzknotens hängt übrigens nicht nur von der Glätte des Tauwerks ab, sondern auch von seiner Biegsamkeit, der so genannten Lehnigkeit. Bei dicken und dadurch steifen Tauen hält der Kreuzknoten trotz rauer Oberfläche nicht.

ERRATA

»Rückschlag für die Diagnostik«, Forschung aktuell, *Spektrum* Juli 2017, S. 24

Die Halbwertszeit von Molybdän-99 beträgt nicht wie angegeben 66 Tage, sondern lediglich 66 Stunden. Thorsten Imkamp hat uns darauf aufmerksam gemacht.

»Unruhiger Lavasee«, Spektrogramm, *Spektrum* Juli 2017, S. 8

Der Pfeil, der auf den ringförmigen Lavasee Loki Patera auf dem Jupitermond Io deuten sollte, war falsch platziert. Hier die richtige Position.



SciViews

Die besten Wissenschaftsvideos im Netz.



unsplash / Anna Demianenko / CCO

SciViews ist das neue Videoportal von **Spektrum der Wissenschaft**. Hier finden Sie die besten Webvideos rund um Wissenschaftsthemen, ausgewählt von unseren Redakteuren und vorgestellt von Fachjournalisten und Wissenschaftsbloggern.

www.SciViews.de

Spektrum
der Wissenschaft

Mit den besten Videos unserer nationalen und internationalen Medienpartner:



Max-Planck-Institut
für Festkörperforschung



dasgehirn.info
Der Kosmos im Kopf



HZB Helmholtz
Zentrum Berlin



LINDAU
NOBEL LAUREATE
MEETINGS

nature

futur III

Haustürverkauf

Ein Vertreter, der genau weiß, was seine Kunden wollen.

Eine Kurzgeschichte von Jacqueline Montemurri

Als es klingelte, hatte sie den Dampfgerar gerade eingestellt. Das Essen würde in 20 Minuten fertig sein. Sie öffnete die Haustür in Erwartung ihrer Kinder, die um diese Zeit von der Schule kommen mussten.

»Guten Tag, Frau Salowski, ich bin Herr Müller, Ihr Betreuer.«

Sie stutzte und blickte sich verstoßen um, ob ein Nachbar in der Nähe war. Niemand zu sehen. Aber in dieser Reihenhaussiedlung wusste man nie, wer einen hinter den Vorhängen stehend beobachtete.

»Betreuer? Von was, bitte?«, fragte sie irritiert und dachte: Herr Müller, welch kreativer Name.

»Von Ihrem Onlineshop SBK – Schnell Besser Kundennah.«

»A – ha«, entfuhr es ihr gedehnt. Sie wusste gar nicht, dass ein Online-shop Vertreter an die Haustür schickte. Als hätte Herr Müller ihre Gedanken gelesen, fügte er sogleich hinzu:

»Dieser Service ist neu. In der Testphase sozusagen.« An den Worten klebte ein kaum sichtbares Lächeln.

»Sind Sie mit unseren Produkten zufrieden?«

»Ja, ich denke schon.«

»Aber warum haben Sie dann in letzter Zeit nichts mehr bestellt?«

Frau Salowski stutzte. »Weil ich gerade nichts brauche.«

»Nun«, kam es von Herrn Müller zurück, »laut Ihren Surfgehnheiten im Internet wünschen Sie sich derzeit ein neues TV-Gerät.«

»Was? Wie kommen Sie denn darauf?«

»Sie haben sich in letzter Zeit fünf verschiedene Modelle in drei verschiedenen Onlineshops angesehen – unserer eingeschlossen.«

»Also, das ist ja wohl die Höhe.«

»Oh nein, Frau Salowski, das ist unser Service: SBK – Schnell Besser Kundennah.«

»Aber Sie können doch nicht einfach in meinen Daten herum-schnüffeln.«

»Wir können, Frau Salowski. Darin sind wir führend. Wir analysieren Ihre Daten und präsentieren Ihnen das gewünschte Produkt.«

Das geht aus Ihrem aktuellen TV-Konsum hervor.«

»Ach.« Frau Salowski blickte Herrn Müller sprachlos an.

»Deshalb möchte ich Ihnen ein viel interessanteres Angebot unterbreiten: eine Pauschalreise nach Afrika.«

»Wie bitte? Aber ich kann ...«, weiter kam Frau Salowski nicht.

»Keine Angst. Aus der Analyse Ihrer Posts in den sozialen Netzwerken sind wir voll und ganz darüber informiert, dass Sie Angst vor dem Fliegen haben.«

»Hä?«

»Deshalb haben wir Ihnen ein maßgeschneidertes Programm zusammengestellt: Sie fahren mit dem Kreuzfahrtschiff nach Kapstadt, und dann geht es mit dem Jeep auf Fotosafari.«

Frau Salowski rieb sich die Augen. »Ich muss jetzt noch etwas erledigen«, antwortete sie und wollte die Tür schließen. Doch diese ließ sich nicht bewegen.

»Aus den Daten Ihrer Cloud haben wir die Sicherheitseinstellungen Ihrer

»Laut Ihren Surfgehnheiten im Internet wünschen Sie sich derzeit ein neues TV-Gerät«, sagte Herr Müller

»Wie kann ich Ihnen weiterhelfen ... Herr Müller?« Frau Salowski grinste belustigt bei ihren Worten.

»Oh, nicht Sie sollen mir, sondern ich möchte Ihnen weiterhelfen. Dazu würde ich Sie gern zu unserem Service befragen.«

»Nun, dann fragen Sie«, forderte Frau Salowski Herrn Müller auf.

»Wollen Sie mir jetzt einen Fernseher andrehen?«

»Nein, Frau Salowski.«

»Gut. Kann ich mir im Moment auch nicht leisten.«

»Ihr Wunsch nach einem neuen TV-Gerät«, fuhr Herr Müller fort, »wurde hervorgerufen von dem Interesse an afrikanischen Wildtieren.

Immobilie herausgelesen. Somit konnte ich den Türmechanismus beeinflussen. Entschuldigen Sie bitte die Umstände. Doch manchmal müssen die Menschen zu ihrem Glück gezwungen werden.«

Frau Salowski blickte Herrn Müller fassungslos an. »Ich glaube, ich sollte die Polizei rufen.« Sie war nun sicht-

lich beunruhigt. Der Schweiß stand ihr auf der Stirn.

»Frau Salowski, davon möchte ich Ihnen dringend abraten. Aus den Aufzeichnungen der Überwachungskamera an Ihrem Arbeitsplatz geht hervor, dass Sie sich schon mehrmals

»Ich glaube, ich spinne.«

»Nein, Sie spinnen nicht. Sie gewinnen. Leisten Sie sich diesen wunderbaren Traum, und Sie werden sehen, dass er Ihr Leben bereichert. Wahrscheinlich werden Sie sich danach die Sitzungen bei Ihrem Psy-

»Danke schön, Frau Salowski«, erwiderte Herr Müller freundlich. »Mit Ihrer Unterschrift für das TV-Gerät haben Sie gleichzeitig auf Ihr Rücktrittsrecht bei Haustürverkäufen verzichtet.«

»Was?«

»Unser Direkt-Kredit ist genau auf Sie zugeschnitten. Die Raten passen hervorragend zu Ihrer derzeitigen Finanzsituation«

aus der Supermarktkasse bedient haben. Das könnte die Polizei interessieren.«

»Das ist nicht wahr!« Frau Salowskis Stimme schallte durch die ordentlich gepflegten Vorgärten. »Das stimmt doch gar nicht. Wie können Sie so etwas behaupten?«, fügte sie leise hinzu.

»Wir behaupten nichts. Wir analysieren nur Daten.«

»Vielleicht manipulieren Sie auch Daten.«

»Nein. Das ist nicht nötig. Menschen sind Menschen und machen Fehler. Wir machen keine Fehler.«

»Ach.« Frau Salowski presste die Lippen aufeinander. »Okay. Ich habe einmal einen Fehler gemacht. Daraus wollen Sie mir jetzt einen Strick drehen?«

»Nein. Ich möchte Sie auf eine schöne Reise schicken.«

»Dafür habe ich aber kein Geld.«

»Das ist kein Problem, Frau Salowski. Unser Direkt-Kredit ist genau auf Sie zugeschnitten. Die Raten passen – nach Auswertung der Daten Ihres Onlinebanking-Portals – hervorragend zu Ihrer derzeitigen Finanzsituation.«

chotherapeuten sparen können, den Sie – laut Ihrer digitalen Gesundheitskarte – monatlich besuchen.«

Frau Salowski erstarrte. »Das kann doch wohl alles nicht wahr sein.«

»Oh doch. SBK – Schnell Besser Kundennah. Wir machen Ihre Träume wahr!«

Frau Salowski blickte sich um und versuchte zu erkennen, ob im Nachbarhaus jemand das Geschehen beobachtete. Doch da war niemand. »Na gut«, gab sie klein bei. »Wo muss ich unterschreiben?« Sie hatte schließlich ein Rücktrittsrecht bei Haustürgeschäften, dachte sie ein wenig erleichtert.

»Für unsere persönlich auf Sie zugeschnittene Reise unterschreiben Sie bitte hier.« Herr Müller hielt ihr ein Pen Pad unter die Nase. »Für den Kredit hier, für die Rücktrittsversicherung hier und für den Gutschein eines nagelneuen TV-Geräts als Bonus bitte hier.«

»Oh, ein neues TV-Gerät als Bonus. Das hört sich gut an.« Frau Salowski unterschrieb eilig alle Dokumente, denn sie erblickte schon ihre Kinder am Ende der Straße.

Von drinnen war der Piepton des Dampfgarers zu vernehmen, der das Ende des Garprogramms verkündete.

»Es hat mich sehr gefreut, mit Ihnen Geschäfte zu machen. Aus den Daten des Computers der örtlichen Schule analysierten wir Ihren Intellekt und Bildungsstand, so dass wir unser Gespräch voll und ganz auf Sie zuschneiden konnten. Ich wünsche Ihnen noch einen schönen Tag und guten Appetit.« Herr Müllers Bildschirm erlosch, und das animierte Gesicht verschwand. Er steigerte das Drehmoment seiner vier Rotoren und ging vom Schwebzustand in den Steigflug über.

Frau Salowski blickte der davonfliegenden Drohne verwirrt nach. An der Seite des kleinen Fluggeräts prangten die Worte: SBK – Schnell Besser Kundennah.

DIE AUTORIN

Jacqueline Montemurri studierte Luft- und Raumfahrttechnik und lebt im Bergischen Land. Sie hat zahlreiche fantastische Kurzgeschichten in Zeitschriften und Anthologien veröffentlicht sowie den Zukunfts-Thriller »Die Maggan-Kopie«.

www.jacquelinemontemurri.blogspot.de

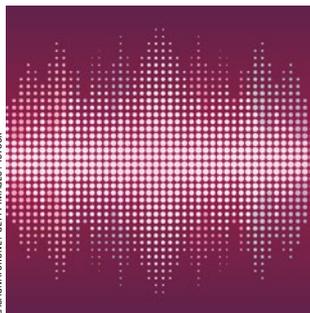
VORSCHAU



IDEAS, STUDIO / GETTY IMAGES / ISTOCK BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

VISIONEN DES QUANTEN-MULTIVERSUMS

Der frühe Kosmos dehnte sich extrem aus. Neben unserem All könnte dabei eine unermessliche Zahl an Paralleluniversen entstanden sein. Einige Physiker verbinden dieses Bild mit einer Interpretation der Quantenmechanik, nach der alle möglichen Ausgänge eines Experiments Wirklichkeit werden – jedoch in verschiedenen Welten. Hilft die Vereinigung beider Konzepte, den Charakter der Zeit und andere fundamentale Vorgänge besser zu verstehen?



LASAGNARONE / GETTY IMAGES / ISTOCK

SYNTHETISCHE SPRECHSTIMMEN

Eine Maschinenstimme kann die eines echten Menschen fast perfekt imitieren, eine junge Stimme alt wirken lassen oder umgekehrt – und mit verständlichen Worten brüllen wie ein Löwe.



JON FOSTER

GEHEIMNISUMWITTERTE EVOLUTION DER VÖGEL

Vögel sind Dinosaurier – streng genommen. Sie entstanden nicht etwa rasch in wenigen markanten Evolutionsschritten. Ihre Charakteristika bildeten sich vielmehr erst langsam aus und hatten meist zunächst völlig andere Zwecke als heute.



NASA

NEUER BLICK AUF FREMDE WELTEN

2018 soll das James Webb Space Telescope ins All starten. Das Infrarotteleskop wird unter anderem die Atmosphären ferner Exoplaneten analysieren. Kann es so die Frage beantworten, ob es dort Leben gibt?

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), fast 10 % günstiger als der Normalpreis.

Wunschgeschenk:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

Keine Mindestlaufzeit:

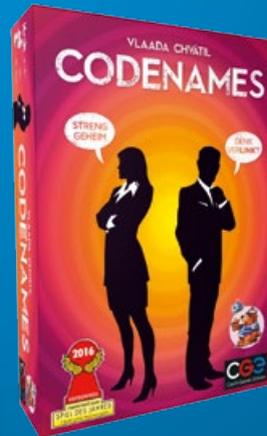
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:

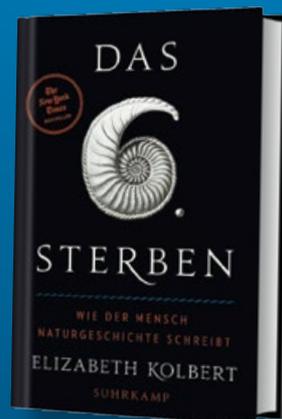
Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

Spiel »Codenames«

Ausgezeichnet als Spiel des Jahres 2016. Nur die Geheimdienstchefs kennen die Identitäten ihrer Agenten. Das Team, das als erstes alle Codenamen gefunden hat, gewinnt.



**Wählen
Sie Ihr
Geschenk**



Buch »Das 6. Sterben«

Ausgezeichnet mit dem Pulitzer-Preis. Wie keine andere Gattung zuvor haben wir Menschen das Leben auf der Erde verändert. In dem Bestseller erklärt uns Elizabeth Kolbert, wie das geschehen konnte.

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 2.300 Profilen herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature