

# Spektrum

der Wissenschaft

## Das Quanten- Multiversum

Was verrät die Quantenmechanik über  
kosmische Parallelwelten?

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

**EVOLUTION** Vögel – die letzten lebenden Dinosaurier  
**KÜNSTLICHE STIMMEN** Maschinen können jetzt wie Menschen sprechen  
**REFORMATION** Ihre Wurzeln liegen tief im Mittelalter



Spektrum  
der Wissenschaft

DIE WOCHE

DAS WÖCHENTLICHE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

## Das Kombipaket im Abo: App und PDF

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



[www.spektrum.de/abonnieren](http://www.spektrum.de/abonnieren)



# EDITORIAL FORSCHUNG UND FIKTION

Von Hartwig Hanser, Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.de

► Ferienzeit ist Schmöckerzeit. Das war auch schon in meinem Studium so: Als ich 1991 in der Stadtbücherei nach geeigneter Lektüre für den Sommerurlaub stöberte, entdeckte ich in der Ecke mit den Neuerscheinungen den viel versprechenden Titel »DinoPark« von Michael Crichton. Der Roman sollte gut zwei Jahre später als Vorlage zu Steven Spielbergs Kinohit »Jurassic Park« zu Weltruhm gelangen; damals war er eher noch ein Geheimtipp. Besonders interessant fand ich natürlich die wissenschaftlichen Facetten der Story – befand ich mich doch gerade mitten in meinem Biochemiestudium. Zentral für die Handlung ist eine fiktive molekularbiologische Technik, mit der Saurier-DNA aus in Bernstein erhaltenen Stechmücken voller Dinoblut gewonnen wird.

Ein anderer, nicht weniger interessanter Aspekt des Romans liegt indes viel näher an der Forschungsrealität, ja ist inzwischen sogar von dieser überholt: Die Erkenntnis, dass die Vögel von einem Zweig der Dinosaurier abstammen, war damals eine in der Bevölkerung noch wenig bekannte Tatsache. Crichtons Buch und dann Spielbergs Verfilmung sorgten als Erste für eine breite Popularisierung dieses Zusammenhangs.

Inzwischen gehen die Paläontologen noch weiter: Laut neueren Untersuchungen sind die Vögel mit den Urzeitviechern nicht nur sehr eng verwandt, sie sind selbst schlicht und einfach Dinosaurier, und ihre Vorfahren lassen sich von den ausgestorbenen Arten nicht klar abgrenzen. Möglicherweise haben ihnen gerade jene vogeltypischen Merkmale wie Luftsäcke und Hohlknochen, die verschiedene Spezies bereits lange zuvor zu anderen Zwecken entwickelt hatten, geholfen, sich an die abrupten Umweltänderungen vor rund 65 Millionen Jahren anzupassen, wie der Paläontologe Stephen Brusatte ab S. 30 vorschlägt.

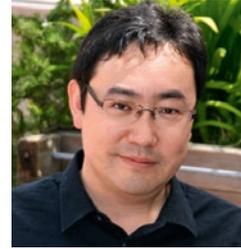
Neue Erkenntnisse zum Leben auf der Erde sind eine Sache. Eine ganz andere ist die Frage nach Leben auf anderen Planeten, wiederum ein beliebtes Thema des Sciencefiction-Genres. Seit Astronomen mehr und mehr solcher Himmelskörper um andere Sterne entdecken, rückt die Überlegung wieder in den Vordergrund, ob sich auf diesen vielleicht auch Organismen entwickeln konnten. Mit der Untersuchung der Atmosphären derartiger Exoplaneten lässt sich dazu mehr herausfinden (S. 64). Vielleicht wird ja eines Tages auch hier der wissenschaftliche Erkenntnisfortschritt die Hoffnungen übertrumpfen.

Erwartungsvoll grüßt Ihr



Seit 2005 schreibt Michael Springer regelmäßig für »Spektrum der Wissenschaft« in seiner Rubrik »Springers Einwürfe«. Jetzt erscheint eine Auswahl seiner Texte unter dem Titel »Unendliche Neugier. Was die Wissenschaft treibt« als Buch.

## AUTOREN DIESER AUSGABE



### YASUNORI NOMURA

Der Physiker beschäftigt sich mit Symmetriekonzepten und der Theorie der Quantengravitation. Seine Verbindung von quantenmechanischen mit kosmologischen Ideen erläutert er ab S. 12.



### CHANTAL ABERGEL UND JEAN-MICHEL CLAVERIE

zählen zu den Entdeckern der Riesenviren. In Gewässer- und Bodenproben, selbst im Permafrostboden Sibiriens fanden sie Arten von erstaunlicher Vielfalt (S. 38).



### VOLKER LEPPIN

Der Tübinger Kirchenhistoriker forscht nach den Wurzeln von Luthers Überzeugungen – und findet etliches von dem, was der Reformator verkündete, in den geistigen Strömungen seiner Zeit wieder (S. 80).

## 3 EDITORIAL

## 6 SPEKTROGRAMM

Im Auge des Jupiters

Beweis zur  
Fünfeckpflasterung

Sonnenschutz für Pflanzen

Charmantes Teilchen

Meerwasser stärkte  
römischen Beton

Rasende Sterne

Artenvielfalt der Frösche

## 20 FORSCHUNG AKTUELL

### Regen in der Sahelzone

Neues Modell erlaubt stark  
verbesserte Prognose.

### Proteinschicksale

Wie lange leben einzelne  
Eiweißmoleküle?

### Grenzenlose Präzision

»Negative Masse« beseitigt  
Quantenrauschen.

### Rettung für die Retina

Lässt sich die Augenkrank-  
heit Retinopathia pigmen-  
tosa aufhalten?

## 29 SPRINGERS EINWÜRFE

### KI → ML

Maschinelles Lernen wird  
unser Leben grundlegend  
verändern.

## 49 FREISTETTERS FORMELWELT

### Was Schwarze Löcher wirklich seltsam macht

Monster, die alles ansaugen,  
sind sie jedenfalls nicht!

## 70 SCHLICHTING!

### Vernebelte Durchsichten

Bei der Streuung an Parti-  
keln kommt es vor allem auf  
den Abstand an.

## 12 PARALLELWELTEN REISE INS QUANTENMULTIVERSUM

Physiker verknüpfen die Hypothese vieler kosmologischer Realitäten mit einer alternativen Interpretation der Quantenmechanik.

Von Yasunori Nomura

## 30 PALÄONTOLOGIE DAS PUZZLE DER VOGEEVOLUTION

Die Vögel entstanden nicht in kurzer Zeit in wenigen Schritten. Schon lange vor ihrem Auftreten besaßen Dinosaurier viele ihrer Eigenschaften.

Von Stephen Brusatte

## 38 EVOLUTION FASZINIERENDE RIESENVIREN

**Serie: Viren (Teil 2)** Vor 15 Jahren entdeckten Forscher die ersten Riesenviren. Ihr Ursprung könnte in die Frühzeit des Lebens vor 3,7 Milliarden Jahren zurückreichen.

Von Chantal Abergel und Jean-Michel Claverie

## 44 GENETIK MITNICHTEN TÖDLICHE MUTATIONEN

Zehntausende menschliche Genome liegen heute sequenziert vor. Und es zeigt sich: Vermeintlich krank machende Mutationen sind oft harmlos.

Von Erika Check Hayden

## 50 COMPUTERTECHNIK DIE PERFEKTE KÜNSTLICHE STIMME

Inzwischen kann eine Maschinenstimme die eines Menschen täuschend echt imitieren.

Von Nicolas Obin und Axel Röbel

## 60 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN EINE »ATMENDE« STROMQUELLE

Eine Batterie, die Lufsauerstoff als Stromquelle nutzt, kann sich jeder mit einer Cola-Dose und etwas Aktivkohle selbst bauen.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

## 64 EXOPLANETEN BLICK IN DIE ATMOSPHEREN FREMDER WELTEN

Das James Webb Telescope soll von 2018 an die Atmosphären von Exoplaneten ins Visier nehmen. Vielleicht stoßen Astrophysiker mit seiner Hilfe auf Nachweise außerirdischen Lebens.

Von Kevin Heng

## 72 MATHEMATISCHE LOGIK BEDROHLICHE UNENTSCHEIDBARKEIT

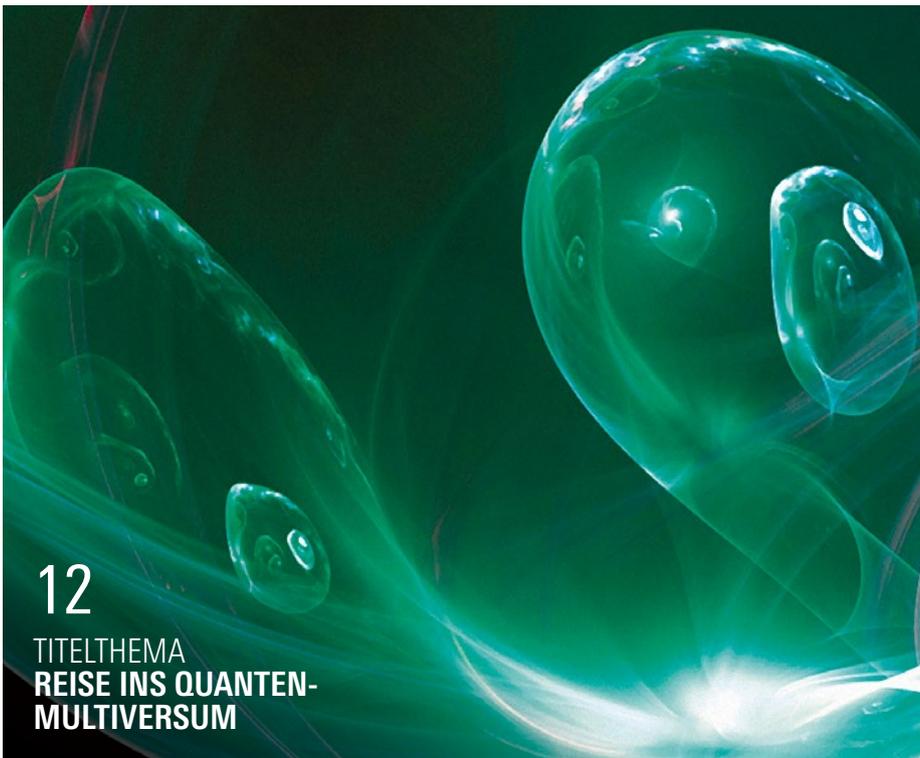
Aussagen, die man weder beweisen noch widerlegen kann, sind weniger esoterisch, als es bislang den Anschein hatte.

Von Jean-Paul Delahaye

## 80 KIRCHENGESCHICHTE LUTHERS WURZELN IM SPÄTEN MITTELALTER

Die Reformation kam nicht wie ein Blitzschlag aus heiterem Himmel. Martin Luther hat Spannungen seiner Zeit aufgegriffen und transformiert.

Von Volker Leppin



12

TITELTHEMA  
REISE INS QUANTEN-  
MULTIVERSUM



38

EVOLUTION  
FASZINIERENDE  
RIESENVIREN



50

COMPUTERTECHNIK  
DIE PERFEKTE  
KÜNSTLICHE STIMME



64

EXOPLANETEN  
BLICK IN  
DIE ATMOSPHÄREN  
FREMDER WELTEN



80

KIRCHENGESCHICHTE  
LUTHERS WURZELN  
IM SPÄTEN MITTELALTER

87 ZEITREISE

Von der Bastgewinnung  
zum Rasterelektronen-  
mikroskop

88 REZENSIONEN

**Ralf-Peter Märtin:**

Die Alpen in der Antike

**Paul Curzon, Peter W.**

**McOwan:** The Power of  
Computational Thinking

**Bruno P. Kremer:**

88 verblüffende Pflanzen

**Anika Geisler (Hg.):**

Die Diagnose

**Florian M. Nebel:** Die

Besiedlung des Mondes

**Axel Bojanowski:**

Wetter macht Liebe

94 LESERBRIEFE

95 IMPRESSUM

96 FUTUR III

**Das Vierte  
Menschengesetz**

Nicht nur Roboter haben  
Rechte!

98 VORSCHAU

Titelbild:

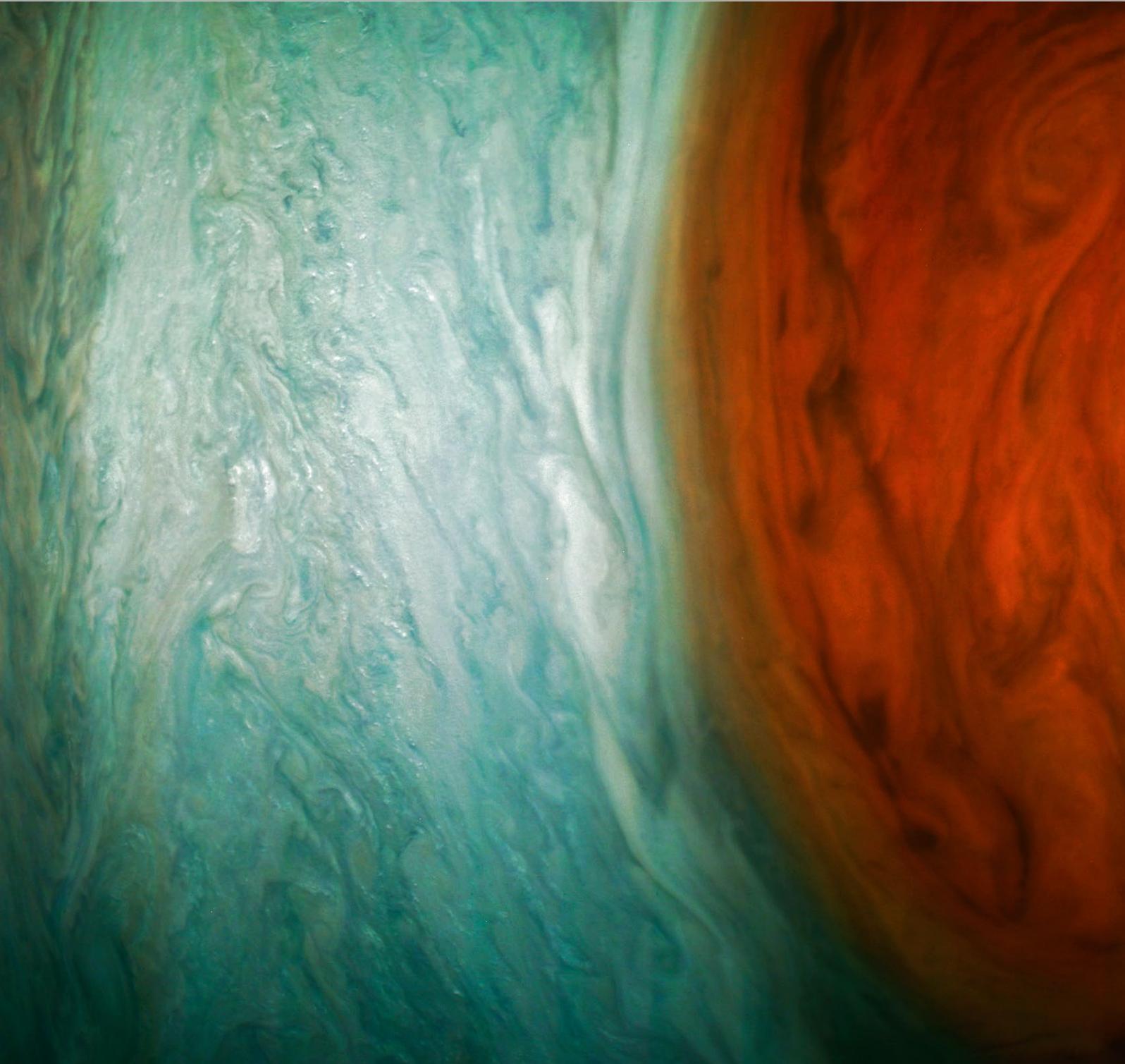
Ideas\_Studio / Getty Images / iStock;  
Bearbeitung: Spektrum der Wissen-  
schaft



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

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

# SPEKTROGRAMM



NASA / JPL-CALTECH / SWRI / MSSS / GERALD EICHSTÄDT

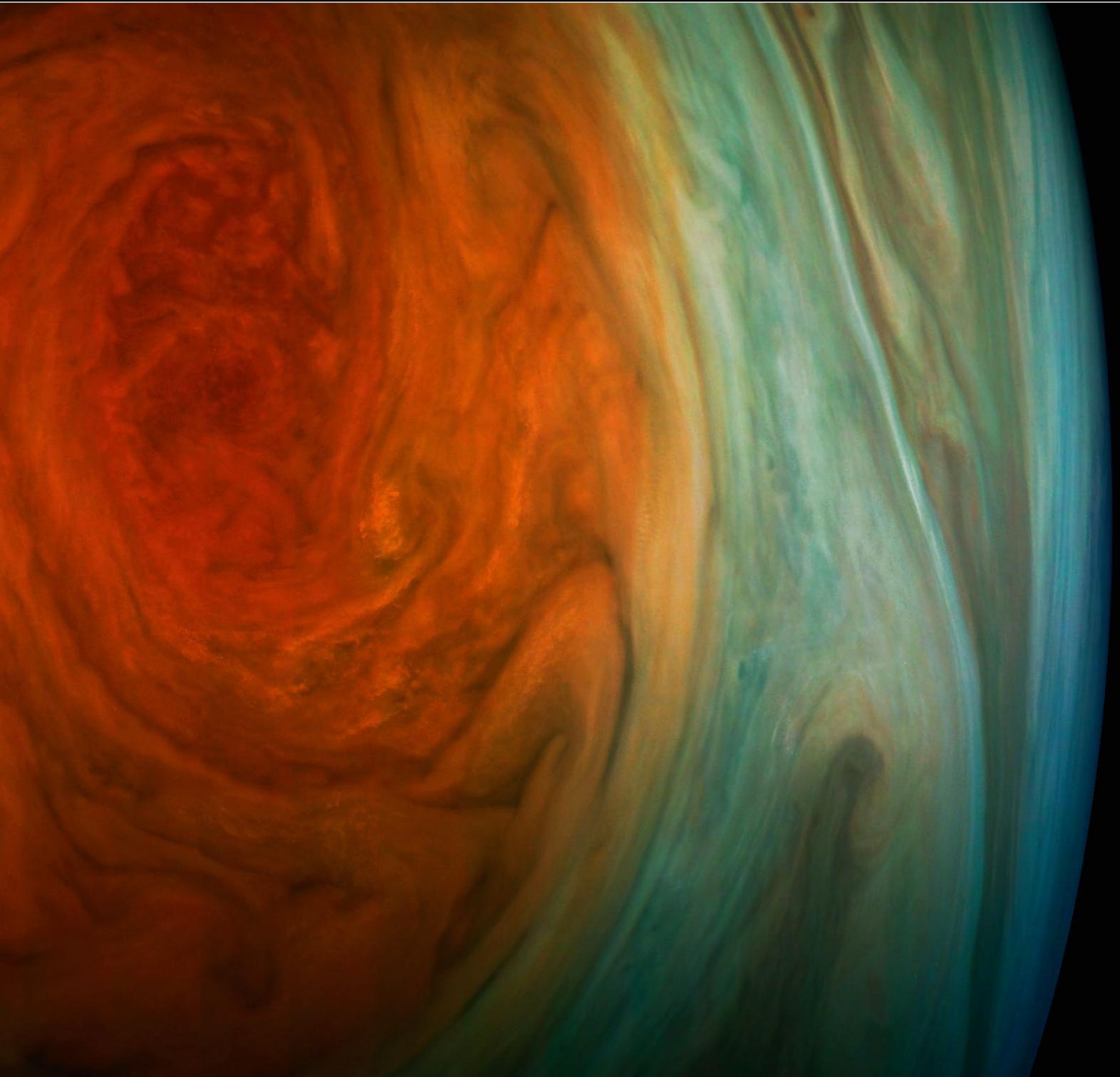
## IM AUGE DES JUPITERS

▶ Seit Hunderten von Jahren tobt ein gewaltiger Wirbelsturm durch die Atmosphäre des Jupiters. Der »Große Rote Fleck«

erstreckt sich über eine Breite von 16 300 Kilometern – eine Strecke, die knapp 30 Prozent größer ist als der Durchmesser der

Erde. Nun hat die Raumsonde Juno die bisher detailliertesten Fotos der Region aufgenommen: Am 11. Juli 2017 flog der NASA-

Satellit 9000 Kilometer über die Wolkendecke des Sturms hinweg. Die dabei gewonnenen Rohbilder wurden anschließend ins

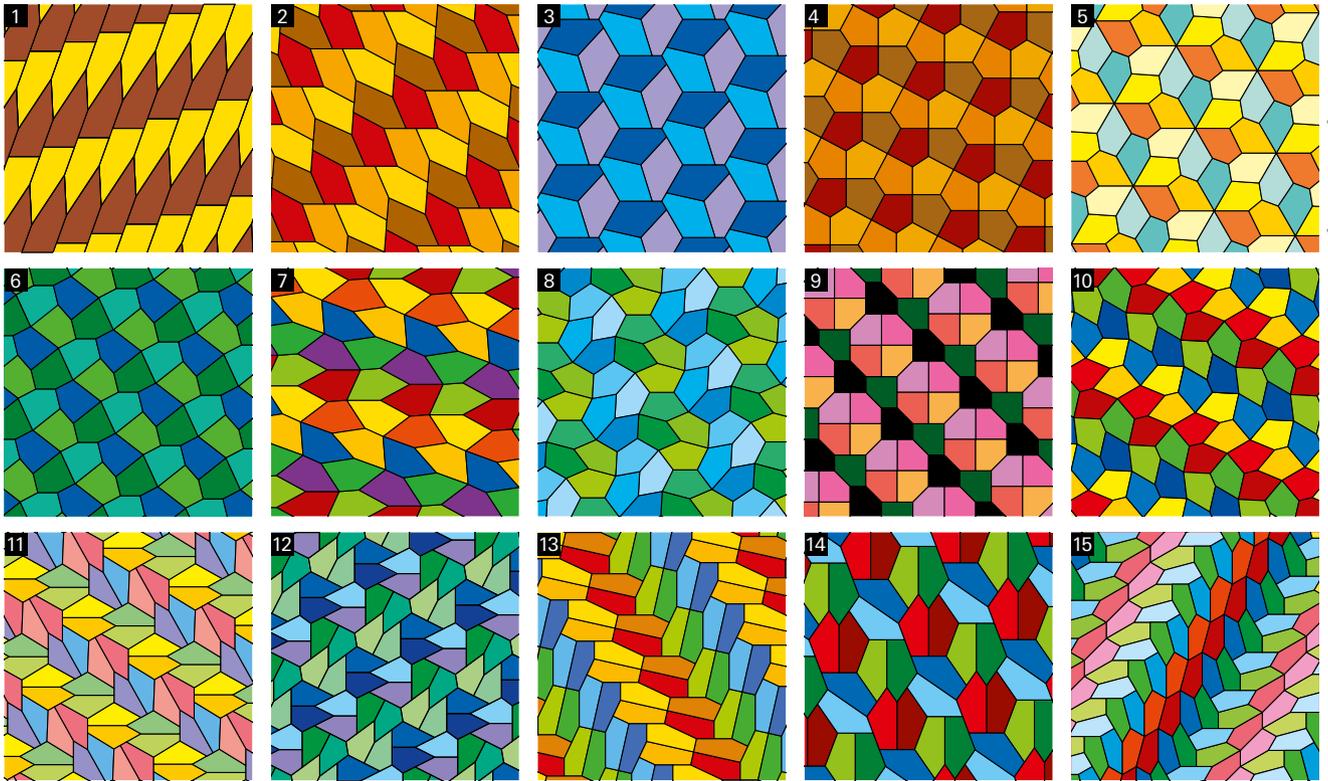


NASA / JPL-CALTECH / SWRI / MSSS / GERALD EICHSTÄDT

Internet gestellt und von Amateuren nachbearbeitet. Beim hier abgebildeten Foto sind die Farben aufgehellt, wodurch das Rot deutlicher hervortritt. Die Bordkamera von Juno ver-

wendet ein extremes Weitwinkelobjektiv, ein so genanntes Fischauge, was den Aufnahmen eine besondere Ästhetik verleiht. Auf den Bildern sind bisher unbekannte Einzelheiten des

Großen Roten Flecks zu sehen, unter anderem längliche dunkle Wolken, die sich Adern gleich durch die rötlichen Gefilde des Sturmwirbels winden.  
*NASA-Pressemitteilung, 13. Juli 2017*



WOLFRAM DEMONSTRATIONS PROJECT. [HTTP://DEMONSTRATIONS.WOLFRAM.COM/COMPENSATINGPENTAGONS/](http://demonstrations.wolfram.com/COMPENSATINGPENTAGONS/). AUTOR: ED PEGG JR., EINWÄRINGER, CHRISTOPH HÖPPE

Die 15 Typen von Fünfeck-Pflasterungen: Die ersten fünf entdeckte Karl Reinhardt 1918. Die Nummern 6 bis 8 stammen von Richard Kershner, einem US-amerikanischen Ingenieur, 9 vom Informatiker Richard James. 10, 11, 12 und 13 fand Marjorie Rice, eine Hausfrau aus Kalifornien, 14 der deutsche Doktorand Rolf Stein. Die letzte Klasse förderte 2015 eine Computersuche der kanadischen Mathematiker Casey Mann, Jennifer McLeod und David Von Derau zu Tage.

## MATHEMATIK BEWEIS ZUR FÜNF- ECK-PFLASTERUNG

Die Suche nach konvexen Fünfecken, die eine Fläche lückenlos pflastern, scheint ein Ende zu haben. Der Computerwissenschaftler Michaël Rao von der École normale supérieure de Lyon hat einen Beweis ausgearbeitet, dem zufolge es insgesamt bloß 15 solcher Pentagon-Parkettierungen gibt – die letzte von ihnen hatten kanadische Mathematiker 2015 entdeckt (siehe **Spektrum** November 2015, S. 62).

Damit würde eine knapp 100 Jahre währende Mathe-

matik-Saga zum Abschluss kommen. Sie geht auf den Frankfurter Mathematiker Karl Reinhardt zurück, der 1918 in seiner Doktorarbeit untersucht hatte, welche konvexen Vielecke in lauter kongruenten Exemplaren eine unendliche ausgedehnte Fläche lückenlos und überschneidungsfrei bedecken.

Reinhardt konnte damals zeigen, dass alle Dreiecke und sämtliche konvexen Vierecke für eine derartige Parkettierung geeignet sind. Unter den Sechsecken gibt es nur drei Typen. Fünfecke entpuppten sich hingegen als Sonderfall. Der Mathematiker entdeckte zwar fünf nichtregelmäßige Fünfeck-

Familien, die sich für die Parkettierung eignen. Die Mitglieder einer Familie dürfen verschiedene Formen annehmen, solange sie gewisse »Familienmerkmale« beibehalten, zum Beispiel, dass die Summe zweier Winkel 180 Grad ergibt. In den folgenden Jahrzehnten spürten Mathematiker und Autodidakten allerdings weitere Fünfeck-Pflaster auf (Bild oben) – und bis zuletzt war offen, wie viele es sonst noch gibt.

Michaël Rao ging diese Frage nun sehr systematisch an. Ein von ihm erstelltes Computerprogramm hat 371 Möglichkeiten identifiziert, wie

Ecken in einem Fünfeck-Muster zusammenlaufen können. 24 von ihnen können eine Fläche parkettieren. Keine dieser Varianten ist Mitglied einer neuen Familie, argumentiert Rao, weshalb es nicht mehr als die 15 bekannten gebe. Ob er damit Recht hat, ist allerdings noch nicht endgültig geklärt. Mehrere Experten, die die Argumentation in den vergangenen Monaten nachvollzogen haben, konnten keine Fehler finden. Eine abschließende Prüfung durch die Gutachter einer Fachzeitschrift steht bisher aber aus.

<http://perso.ens-lyon.fr/michael.rao/publi/penta.pdf>

## BIOCHEMIE SONNENSCHUTZ FÜR PFLANZEN

► Wenn Pflanzen via Photosynthese zu viel Licht in Energie umwandeln, nimmt ihr Gewebe Schaden. Zellen verfügen deshalb über Schutzmechanismen, mit denen sie überschüssige Sonnenenergie loswerden können. Bei Moosen und Grünalgen konnten Chemiker um Gabriela Schlau-Cohen vom Massachusetts Institute of Technology den

zu Grunde liegenden Prozess nun im Detail nachvollziehen. Demnach spielt das Protein LHCSR1 (»light-harvesting complex stress-related 1«) eine Schlüsselrolle bei der so genannten Fotoprotektion.

Es befindet sich in den Membranen der Chloroplasten und wird je nach Umgebungslicht in mehr oder weniger großen Mengen produziert. Außerdem verändert LHCSR1 abhängig von der Sonneneinstrahlung seine räumliche Gestalt; Biochemiker spre-

chen von einer Konformationsänderung.

Bei bewölktem Himmel funktionieren die Proteine ähnlich wie die normalen Lichtantennen von Photosynthese treibenden Organismen: Sie sammeln Photonen und transportieren sie in die zuständigen Zentren des Photosyntheseapparats. Wenn plötzlich die Sonne hinter den Wolken hervortritt, baut sich das Protein aber um und zerstreut die Strahlungsenergie – ohne sie weiterzuleiten – als Wärme.

Die Transformation hängt dabei vom pH-Wert ab. Dieser verändert sich, wenn durch die Photosynthese viele Wassermoleküle gespalten werden, was Wasserstoffionen (Protonen) freisetzt.

Insgesamt sei der Vorgang schnell und flexibel genug, um die Photosynthese an die je nach Tageszeit oder Bewölkung wechselnden Lichtverhältnisse optimal anzupassen, schreiben die Forscher.

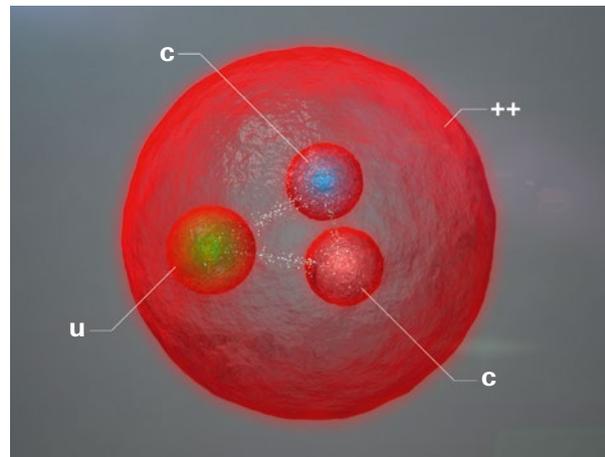
*Nat. Chem. 10.1038/nchem.2818, 2017*

## PHYSIK CHARMANTES TEILCHEN

► Physiker am Genfer Teilchenbeschleuniger LHC haben ein neues subatomares Teilchen entdeckt. Es trägt den Namen  $\Xi_{cc}^{++}$  und ist ein Mitglied der Baryonen-Teilchenfamilie, deren Mitglieder aus drei Quarks bestehen und zu denen auch das Proton und das Neutron gehören. Der Nachweis gelang den Wissenschaftlern mit dem LHCb-Detektor, der gezielt nach seltenen Teilchenzerfällen sucht.

In der 27 Kilometer langen Vakuumröhre des LHC kreisen annähernd lichtschnelle Protonen. An einigen Stellen kollidieren sie, wobei etliche andere Partikel entstehen, darunter auch viele Baryonen. Die Gleichungen der Quantenchromodynamik, welche die Wechselwirkungen zwischen Quarks beschreiben, sagen Dutzende dieser Teilchen voraus. Viele von ihnen haben Forscher in den vergangenen Jahrzehnten an Beschleunigern beobachtet. Alle paar Jahre kommen neue Familienmitglieder hinzu, die bis dahin nur auf dem Papier existierten.

Die meisten bisher nachgewiesenen Baryonen enthalten ein Duo aus vergleichsweise leichten up- und down-Quarks sowie eine schwerere Quark-Variante, beispielsweise ein charm- oder strange-Quark.  $\Xi_{cc}^{++}$  ist in dieser Hinsicht ein Exot: In seinem Inneren finden sich neben einem up-Quark gleich zwei charm-Quarks. Die Forscher vermuten, dass sich die beiden Schwergewichte dicht umkreisen, während das leichtere up-Quark in größerem Abstand um das Duo herumtanzt.



**Neuzugang im Teilchenzoo: Das Baryon  $\Xi_{cc}^{++}$  enthält neben einem leichten up-Quark (u) auch zwei schwerere charm-Quarks (c). Das zusammengesetzte Teilchen besteht nur für wenige Sekundenbruchteile und zerfällt dann in andere Partikel.**

Das neue Teilchen hat eine Gesamtmasse von 3621 Megaelektronvolt, was knapp dem Vierfachen des Protons entspricht. Insgesamt konnten die Physiker im Jahr 2016 gut 300 der exotischen Teilchen nachweisen. Sie existierten allerdings jeweils nur für einige hundert milliardstel Sekunden, vermuten die Forscher. Anschließend zerfielen sie in K- und Pi-Mesonen, die aus jeweils zwei Quarks bestehen, sowie in bereits bekannte Baryonen.

*arXiv 1707.01621, 2017*



J.P. OLESNY / HARVARD UNIVERSITY

2000 Jahre alter Beton: Wissenschaftler nehmen Gesteinsproben an der ehemaligen Hafenanlage von Cosa in der südlichen Toskana.

## MINERALOGIE MEERWASSER STÄRKE RÖMISCHEN BETON

Wissenschaftler haben ein weiteres Geheimnis von »Opus caementicium« gelüftet, dem Beton des Römischen Reichs. Das Material fasziniert Mineralogen seit Langem, schließlich haben Teile von Hafenanlagen aus dieser Epoche bis heute überdauert. Damit sind sie viel beständiger als Mauern aus modernen Baustoffen, die in Meerwasser oft schon nach einigen Jahrzehnten Anzeichen für Altersschwäche zeigen.

Für die Beständigkeit des römischen Betons ist aus Sicht von Materialwissenschaftlern der Zement

verantwortlich, mit dem damalige Bauherren Steinbrocken vulkanischen Ursprungs zusammenklebten. Er bestand neben Kalk auch aus Vulkanasche und wurde mit Meerwasser angerührt. Beim Aushärten dieser Mischung bildeten die Atome ein besonders robustes Kristallgitter, das in zahlreichen Bauwerken seit 2000 Jahren dem Zerfall trotzt.

Nun haben Forscher um Marie Jackson von der University of Utah einen weiteren Grund für die große Stabilität entdeckt. Das Team hat Bohrkerne antiker Hafenanlagen mit Synchrotron-Röntgenstrahlung und einem Elektronenmikroskop untersucht. Dabei stießen die Wissenschaftler auf die Minerale

Phillipsit und Aluminium-Tobermorit. Letzteres bildet plättchenförmige Kristalle aus, die dem Beton zusätzliche Festigkeit verleihen und die Ausbreitung von Rissen verhindern.

Offenbar entstehen die Stoffe, wenn Wasser mit der Zeit in die Wellenbrecher eindringt und dort mit Bestandteilen der Vulkanasche reagiert. Damit verhält sich Opus caementicium völlig anders als heutiger Beton, dessen Hersteller versuchen, chemische Reaktionen innerhalb der Masse zu minimieren, da diese zu Rissen führen können. Die Römer hatten das Glück, einen Zement zu verwenden, bei dem genau das Gegenteil der Fall ist.

*Am. Mineral. 10.2138/  
am-2017-5993CCBY, 2017*

## ASTRONOMIE RASENDE STERNE

Stellt man sich die Milchstraße als riesigen Kreisverkehr vor, so spielt sich größtenteils alles geregelt ab. Die meisten Sterne halten sich an die Geschwindigkeitsbegrenzung und akzeptieren die gültige Bewegungsrichtung. Ein paar wilde Raser tanzen aber aus der Reihe: So genannte Hyperschnellläufer fliegen mit gut 500 Kilometern pro Sekunde durchs All, mehr als dem Doppelten jener Geschwindigkeit, mit der die Sonne ums Zentrum der Milchstraße wandert. Bisher sind etwa 20 solcher Sterne bekannt. Bislang ist unklar, woher sie kommen und wie sie so stark beschleunigt

wurden. Eine Möglichkeit ist, dass sie im Umfeld des extrem massereichen Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Galaxie angestoßen wurden.

Nun macht sich eine Forschergruppe um Douglas Boubert von der University of Cambridge für ein anderes Szenario stark: Vielleicht stammen einige Schnellläufer aus der Großen Magellanschen Wolke, einer 160 000 Lichtjahre entfernten Satellitengalaxie, die sich mit 380 Kilometern pro Sekunde relativ zur Milchstraße bewegt. Dort könnten die Raser einst Teil von Doppelsternsystemen gewesen sein, so die Astrophysiker. Irgendwann explodierte ein Partner aber in einer Supernova, was den Hinterbliebenen auf Wanderschaft schickte. Einige von ihnen konnten daraufhin ihrer Muttergalaxie entkommen – und fliegen nun wegen der hohen Relativgeschwindigkeit enorm schnell durch unsere Galaxie.

Die Forscher stützen ihre Hypothese auf aufwändige Computersimulationen. In ihnen flitzen fliehende Sterne aus der Großen Magellanschen Wolke vor allem durch die Sternbilder Löwe und Sextant. Just in diesen Himmelsregionen haben Astronomen bisher die meisten der Hyper-schnellläufer beobachtet. Insgesamt müsste es in der Milchstraße ungefähr 10 000 solche Raser geben, schätzen die Forscher. Etwa die Hälfte von ihnen sei so schnell unterwegs, dass sie auch aus unserer Galaxie letztlich entkommen müssten.

*Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 469, S. 2151–2162, 2017

## BIOLOGIE ARTENVIELFALT DER FRÖSCHE

► Frösche leben bereits seit etwa 200 Millionen Jahren auf der Erde. Möglicherweise explodierte ihre Artenvielfalt jedoch erst nach einer Katastrophe globalen Ausmaßes: 88 Prozent der heutigen Froschdiversität könnten auf drei Hauptlinien zurückgehen, die das Massenaussterben am Ende der Kreidezeit vor 66 Millionen Jahren überlebten, berichten David Blackburn vom Florida Museum of Natural History und sein Team auf Basis einer groß angelegten phylogenetischen Untersuchung der Amphibienengruppe.

In die Studie flossen Daten zu 95 Genen von 301 Froscharten aus allen bekannten Familien ein. Den daraus abgeleiteten Ablauf der Evolution verglichen die Forscher mit Fossilbefunden, so dass deutlich wurde, wann sich welche Familie von ihren

Vorfahren abspaltete. Demnach überlebten gut ein Dutzend Zweige im Stammbaum der Frösche den Asteroideneinschlag. Drei von ihnen – Hyloidea, Microhylidae und Natatanura – konnten sich kurz darauf offenbar massiv ausbreiten und diversifizieren.

Das Ergebnis würde älteren Arbeiten widersprechen, denen zufolge Frösche bereits 35 Millionen Jahre früher zur Blüte ansetzten. Die Wissenschaftler halten ihr Ergebnis dennoch für schlüssig: Die Amphibien seien sehr anpassungsfähig und könnten nach dem Massenaussterben daher sehr effektiv in ökologische Nischen gesprungen sein. Indem sie sich an neue Lebensräume wie beispielsweise Wälder anpassten, entwickelten sich zahlreiche neue Frosch-Spezies, vermuten die Wissenschaftler.

*PNAS* 10.1073/pnas.1704632114, 2017



**Baumfrösche wie *Boophis marojejensis* auf Madagaskar könnten schnell nach dem Asteroideneinschlag vor 66 Millionen Jahren neue ökologische Nischen besetzt haben.**

BRIAN FREEMUTH / UNIVERSITY OF FLORIDA



Während der Kosmos  
endlos expandiert,  
entstehen darin immer  
wieder abgeschlossene  
Blasen-Universen mit  
individuellen physikali-  
schen Wirklichkeiten –  
so die Leitidee der  
Multiversum-Theorie.

# PARALLELWELTEN REISE INS QUANTEN- MULTIVERSUM

Seit dem Urknall könnte eine unüberschaubare Zahl von Universen mit unterschiedlichen physikalischen Realitäten entstanden sein. Bringt eine alternative Deutung der Quantenmechanik Ordnung in diese hypothetische Vielfalt?



**Yasunori Nomura** ist Direktor des Berkeley Center for Theoretical Physics an der University of California in Berkeley.

► [spektrum.de/artikel/1485121](https://spektrum.de/artikel/1485121)

► Viele Kosmologen glauben heute an das zugegebenermaßen gewöhnungsbedürftige Konzept, unser Kosmos sei nur ein winziger Teil eines weitaus größeren Gefüges, das Multiversum genannt wird. In dieser Vorstellung existieren zahlreiche Universen, in denen jeweils eigene physikalische Gesetze gelten. So wären beispielsweise die Arten und Eigenschaften von Elementarteilchen, die wir für fundamental und unveränderlich halten, in jeder Parallelwelt einzigartig.

Diese Idee entstammt dem Standardmodell der Kosmologie, dem zufolge sich das All zu Beginn exponentiell ausgedehnt hat. Während dieser Phase der so genannten Inflation wären einige Regionen früher zum Stillstand gekommen als andere und hätten sich, bildlich gesprochen, wie Blasen in kochendem Wasser abgesondert. Unser gewohntes Universum wäre dann nur eine Blase neben vielen anderen.

Die Vorstellung, unser Weltraum könnte Teil einer viel gewaltigeren Struktur sein, ist weniger exotisch, als man zunächst denken könnte. Im Lauf der Geschichte haben sich Wissenschaftler schon mehrmals damit anfreundet müssen, dass die sichtbare Welt nicht alles ist. Das Multiversum stellt die Theoretiker aber vor ein besonderes und folgenschweres Problem: Es scheint Vorhersagen unmöglich zu machen – doch gerade diese sind eine wesentliche Voraussetzung für jede nützliche Theorie. Alan Guth vom Massachusetts Institute of Technology, einer der Urheber des Inflationsgedankens, drückte es einmal so aus: »In einem Universum, das sich grenzenlos inflationär ausdehnt, passiert alles, was überhaupt passieren kann, und zwar unendlich oft.«

In einem einzelnen Universum, in dem Ereignisse nur endlich oft eintreten, lässt sich deren relative Häufigkeit durch simples Abzählen ermitteln. In einem Multiversum ist das nicht mehr möglich, und kein Geschehen ist wahrscheinlicher als irgendein anderes. Jedwede Vorhersage erfüllt sich irgendwo, doch diese Tatsache verrät uns nichts über das, was in unserer eigenen Welt geschieht (siehe »Wie vergleicht man Unendlichkeiten?«, S. 14).

Die anscheinend mangelnde Vorhersagekraft hat Physiker lange bekümmert. Einige von ihnen, mich eingeschlossen,

## AUF EINEN BLICK NEUER BLICK AUF VIELE WELTEN

- 1** Der Kosmos dehnte sich unmittelbar nach seiner Entstehung exponentiell aus. Dadurch könnte seither neben unserem Universum eine unüberschaubare Zahl an Paralleluniversen entstanden sein.
- 2** Einige Physiker verknüpfen dieses Bild mit einer Interpretation der Quantenmechanik, nach der alle möglichen Ausgänge eines Experiments in verschiedenen Zweigen der Realität verwirklicht werden.
- 3** Durch die konzeptionelle Verbindung beider Ebenen wollen Theoretiker fundamentale Prozesse aus einem neuen Blickwinkel verstehen, etwa die Frage nach dem Charakter der Zeit.

sen, halten inzwischen die Quantentheorie für einen möglichen Ausweg aus dem Dilemma. Sie beschäftigt sich im Gegensatz zum Multiversum mit den allerkleinsten Objekten. Das kosmologische Bild vom endlos inflationär expandierenden Multiversum könnte mathematisch äquivalent zu einer Deutung der Quantenmechanik sein, die als Viele-Welten-Interpretation bezeichnet wird. Sie ist ein Versuch, die paradoxe Situation zu erklären, wie Teilchen an mehreren Orten gleichzeitig sein können. Eine solche Verbindung beider Theorien könnte nicht nur das Problem der Vorhersagekraft lösen, sondern überdies verblüffende Einsichten in die Natur von Raum und Zeit gewähren.

Ich beschäftigte mich erstmals mit der Idee, als ich die Grundannahmen der Viele-Welten-Interpretation untersuchte. Diese wiederum entwickelten Physiker, um einigen

## Wie vergleicht man Unendlichkeiten?

Beim Multiversum liegt die Frage nahe, wie wahrscheinlich es ist, weitere Universen wie unseres anzutreffen. Sind etwa die hier gemessenen Werte für Teilchenmassen, Ladungen oder die Zahl von Raumdimensionen typisch oder ein exotischer Ausreißer? Weil in einem inflationären Multiversum irgendwann alle Ereignisse unendlich oft eintreten, sind ihre relativen Häufigkeiten – der Quotient zweier unendlich großer Werte – nicht definiert. Das macht quantitative Aussagen unmöglich.

Eine Lösungsstrategie besteht darin, nur die endlich vielen Ereignisse innerhalb eines ausgewählten Zeitintervalls zu berücksichtigen, also die Zeitachse zu beschneiden. Doch das führt zu neuen Schwierigkeiten. Unter anderem weil es im Multiversum keine offensichtlichen Symmetrien gibt, an denen man sich beim Beschnitt orientieren könnte, erzeugt die Prozedur praktisch beliebige Ergebnisse, je nachdem, wie man sie durchführt.

Dazu kommt ein Problem, das als Jugendlichkeits-Paradoxon (englisch »youngness paradox«) bezeichnet wird: Die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb eines gewissen Zeitraums ein bestimmtes Universum entsteht, ist proportional zum Volumen, aus dem es sich gleichsam als Blase abscheiden kann. Da die Raumzeit im Lauf der Inflation exponentiell wächst, sollte es exorbitant mehr jüngere Universen geben. Folglich wäre beispielsweise die Chance deutlich größer, ein Universum mit einer geringfügig höheren Temperatur der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung zu beobachten als der hier gemessenen. Unsere Welt wäre damit höchst unwahrscheinlich. Das Bild eines Quanten-Multiversums könnte einige dieser Komplikationen auflösen.

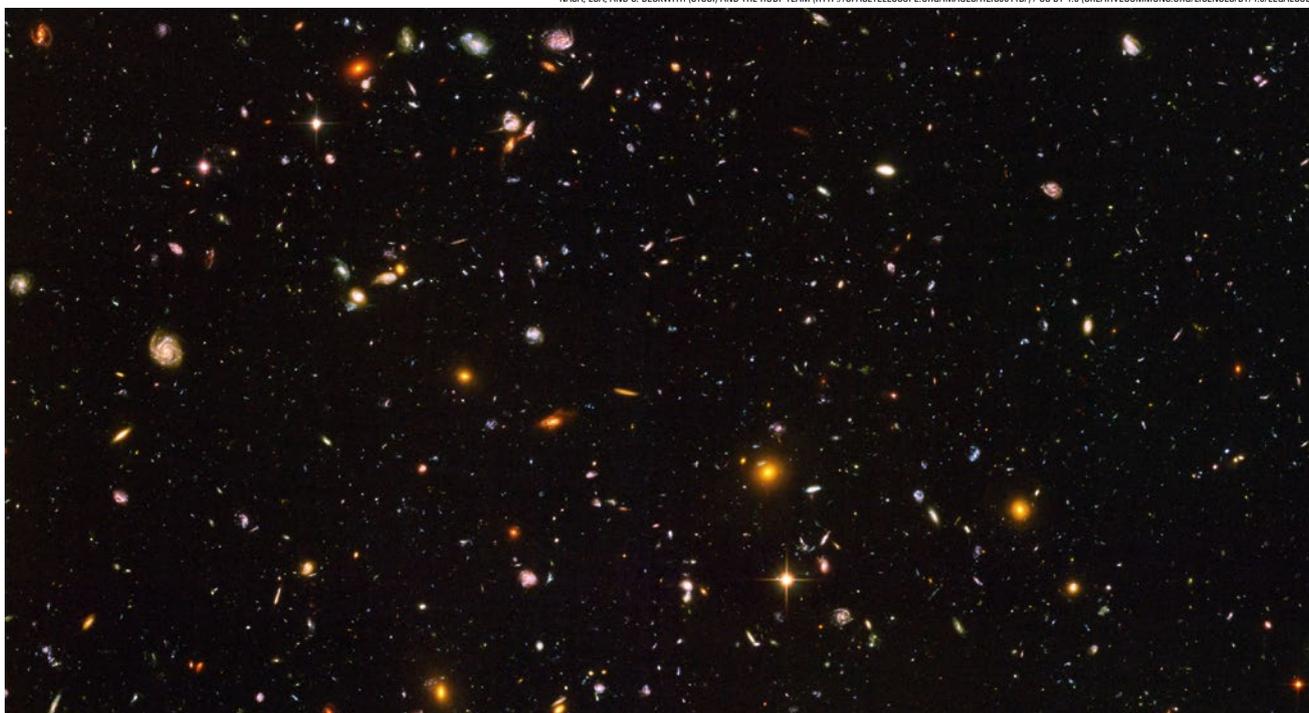
der überraschenden rechnerischen Konsequenzen der Quantenmechanik einen Sinn zu geben. Denn in dieser seltsamen Welt funktionieren Ursache und Wirkung anders als im gewohnten Makrokosmos: Der Ausgang eines Experiments hängt entscheidend vom Zufall ab. In unserer klassischen Welt können wir hingegen gut vorausberechnen, wo ein geworfener Ball landen wird, sobald wir den Startpunkt, die Anfangsgeschwindigkeit und einige weitere Größen kennen. Doch wäre der Ball ein Quantenobjekt, könnten wir ihm lediglich eine gewisse Wahrscheinlichkeit zuschreiben, dort aufzutreffen – vielleicht landet er auch ganz woanders. Diesen zufälligen Charakter können wir außerdem niemals loswerden, egal wie viel wir über den Ball, die Luftströmungen oder andere Umstände in Erfahrung bringen: Er ist eine intrinsische Eigenschaft von Quantensystemen. Der gleiche Ball wird manchmal an Punkt A landen und manchmal an Punkt B. So ein Verhalten erscheint absurd, wurde aber für die Welt der subatomaren Teilchen und ihrer Wechselwirkungen in zahllosen Experimenten bestätigt (siehe »Die Wirklichkeit der Quanten«, *Spektrum* November 2008, S. 54–63).

### Was genau löst den Messvorgang aus – ein Mensch, eine Fliege, ein Molekül?

Wir sprechen in der Quantenwelt von einer Superposition der möglichen Zustände A und B, nachdem der Ball geworfen wurde, doch bevor wir nachschauen, wo er gelandet ist. Das bedeutet, er befindet sich weder an A noch an B, sondern in einer Überlagerung beider Orte (und außerdem vieler weiterer). Sobald wir jedoch hinsehen, ist der Ball an einer eindeutigen Position, etwa an Punkt A. Jeder andere Beobachter wird dieses Resultat bestätigen. Anders ausgedrückt ist der Zustand eine Quantensystems vor einer Messung uneindeutig, danach hingegen liefert jede Überprüfung dasselbe Ergebnis.

Um sich darauf einen Reim zu machen, hängen die meisten Physiker einer bestimmten Interpretation der Quantenmechanik an, die als Kopenhagener Deutung bezeichnet wird. Diese besagt: Die erste Messung verändert das System und versetzt es von einer Überlagerung in einen bestimmten Zustand. Diese Interpretation erklärt den Ausgang von Laborexperimenten, aber schafft gewisse Schwierigkeiten auf der konzeptionellen Ebene. Was genau bedeutet »Messung« überhaupt, und wie erzeugt ein solcher Vorgang aus einem System voller Wahrscheinlichkeiten eine einzige, konkrete Gewissheit? Genügt dafür schon der Blick eines Hundes oder einer Fliege? Stellt bereits die Wechselwirkung mit einem Molekül in der Luft einen Messvorgang dar, der sich auf das Ergebnis auswirkt? Oder brauchen wir aus irgendwelchen physikalischen Gründen einen Menschen, der den Status des Systems bewusst in Erfahrung bringt?

Auf der Suche nach einer Antwort auf solche Fragen entwickelte der US-Physiker Hugh Everett 1957 während seiner Dissertation an der Princeton University die Viele-Welten-Interpretation. Damals wiesen die meisten seiner Kollegen das Konzept harsch zurück, und auch heute ist die Idee immer noch wesentlich weniger populär als die Kopenhagener Deutung. Everetts Grundgedanke war: Der



**Über mehrere Monate haben Astronomen mit dem Hubble-Weltraumteleskop dieses Bild einer kleinen Himmelsregion aufgenommen. Es zeigt zahlreiche Galaxien, darunter besonders alte, die vor rund 13 Milliarden Jahren entstanden sind. Einige noch entlegenere Bereiche des Universums können wir hingegen prinzipiell nicht untersuchen, da sie sich durch die kosmische Expansion schneller als mit Lichtgeschwindigkeit von uns entfernen. Dieser so genannte Beobachtungshorizont spielt eine wichtige Rolle in Theorien über das Multiversum.**

Zustand eines Quantensystems spiegelt denjenigen des gesamten umgebenden Universums wider. Darum müssen wir den Beobachter in eine komplette Beschreibung der Vorgänge einbeziehen. Anders formuliert können wir weder den Ball noch den Wind noch die werfende Hand isoliert betrachten, sondern müssen all ihre fundamentalen Beschreibungen mit einrechnen, eingeschlossen der Person, die den Landeplatz untersucht sowie sämtlicher anderen Dinge im All zu dem Zeitpunkt. In diesem Bild ist der Quantenzustand nach der Messung immer noch eine Überlagerung – allerdings nicht bloß der Punkte A und B, sondern zweier ganzer Welten! In der ersten sieht der Experimentator das System im Zustand A, und jeder weitere Beobachter in dieser Welt wird A bestätigen. Doch im Verlauf des Versuchs trennt sich ein Paralleluniversum ab, in dem der Ball bei B liegt. Das erklärt, warum der Beobachter glaubt, seine Handlungen hätten den Zustand des Systems verändert; tatsächlich hat er sich in zwei Beobachter aufgespalten, die fortan in zwei parallelen Welten mit den Ausgängen A und B existieren.

In dieser Vorstellung haben Menschen und ihre Messungen keine besonders ausgezeichnete Bedeutung. Der Zustand des gesamten Kosmos spaltet sich ständig in viele parallele und gleichermaßen »reale« Wirklichkeiten, die in einer Superposition koexistieren. Ebenso teilt sich jeder Beobachter als Teil des Geschehens immerfort auf. Eine unmittelbare und wichtige erste Schlussfolgerung daraus

wäre, dass alles in der Natur den Gesetzen der Quantenmechanik gehorcht, egal wie klein oder groß es ist. Was hat diese Interpretation nun mit dem Multiversum zu tun, das ja nicht in einer Überlagerung von Welten zu existieren scheint, sondern in einem kontinuierlichen Raum?

#### **Ein- und dasselbe: Die Parallelwelten der Quantenphysik und des Multiversums**

2011 habe ich erstmals die Vermutung geäußert, in einem bestimmten Sinn könnten Everetts viele Welten und das endlos inflationär expandierende Universum dasselbe Konzept sein. Demnach ist der unendlich große Raum, der mit der Inflation entsteht, eine Art Illusion – die zahllosen Universen existieren nicht als isolierte Blasen in einem realen Raum, sondern sie repräsentieren verschiedene Abzweigungen im Lauf der Entwicklung der Wahrscheinlichkeiten. Etwa zu der Zeit, als ich diese Idee veröffentlichte, haben Raphael Bousso von der University of California in Berkeley und Leonard Susskind von der Stanford University einen ähnlichen Gedanken verfolgt. Sollten wir damit Recht haben, würde die Viele-Welten-Interpretation des Multiversums bedeuten, dass die Gesetze der Quantenwelt nicht nur im Mikrokosmos gelten, sondern selbst auf allergrößten Skalen eine Rolle spielen und die globale Struktur des Multiversums formen.

Diese Zusammenhänge lassen sich anhand der Physik Schwarzer Löcher besser erklären. Das sind Bereiche mit

# Die vielen Welten der Inflation

Wenn sich der frühe Kosmos exponentiell ausgedehnt hat, könnten zahllose Universen entstanden sein, von denen unseres nur eines ist. Dieses Bild eines Multiversums scheint der Theorie jedoch jede Vorhersagekraft zu nehmen. Das Problem wird entschärft, wenn man das inflationäre Multiversum mit einer bestimmten Interpretation der Quantenmechanik verbindet. Laut dieser koexistieren die Universen nicht in einem realen Raum, sondern in Form von Wahrscheinlichkeiten.

## 1 Inflationäres Multiversum

Einige Regionen des Kosmos beenden ihre rasche Ausdehnung früher als andere und spalten sich als eigenständige Universen ab. Mit der Zeit würden mehr und mehr solcher abgeschlossenen Blasen entstehen, von denen unsere Welt nur eine wäre.

abgespaltene Universen

endlose inflationäre Ausdehnung

Zeit

Beobachter

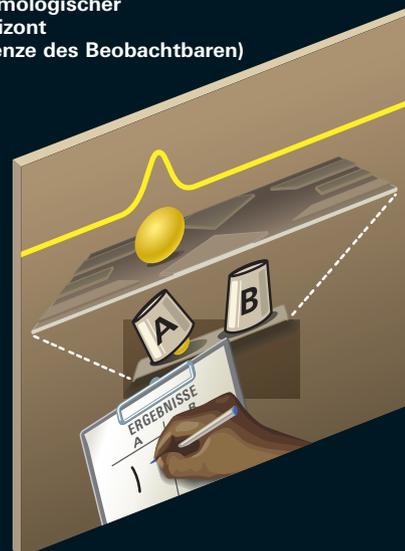
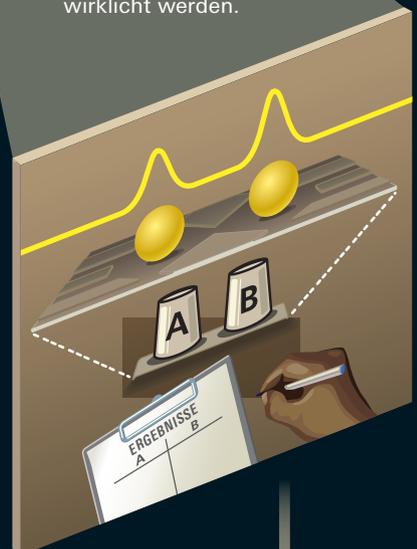
kosmologischer Horizont  
(Grenze des Beobachtbaren)

Zeit

Die Darstellung ist stark vereinfacht. Im Multiversum können auch in den kleineren Blasen weitere Universen entstehen.

## 2 Viele Welten

Laut der Quantenmechanik muss sich ein Teilchen nicht entweder an Ort A oder Ort B befinden, sondern kann in einem Überlagerungszustand an beiden zugleich existieren. Laut einer gängigen Deutung »entscheidet« es sich erst unter den Augen eines Beobachters für einen davon. In der alternativen Viele-Welten-Interpretation entstehen jedoch mit jedem Experiment Parallelwelten, in denen alle möglichen Ausgänge gleichermaßen verwirklicht werden.

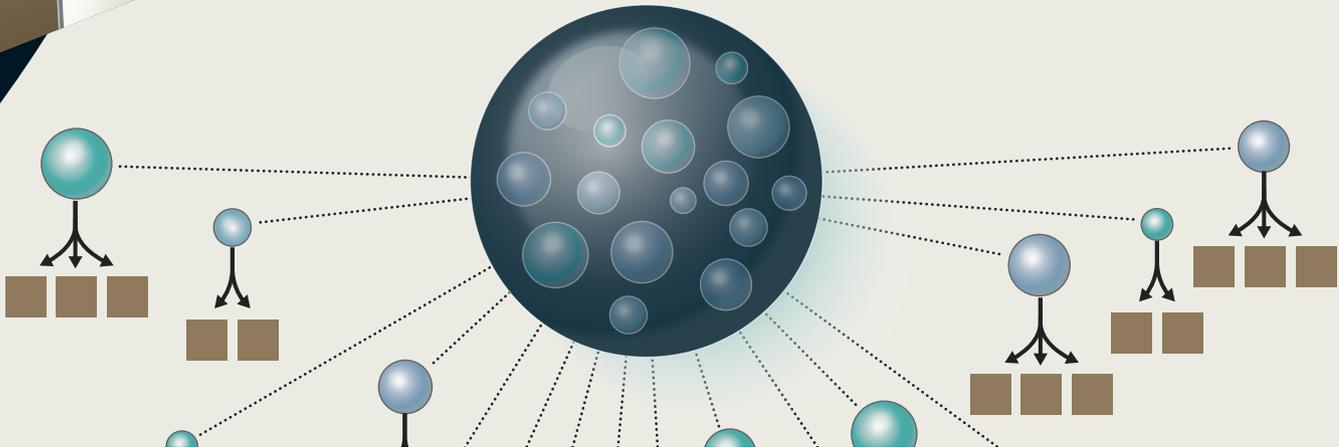
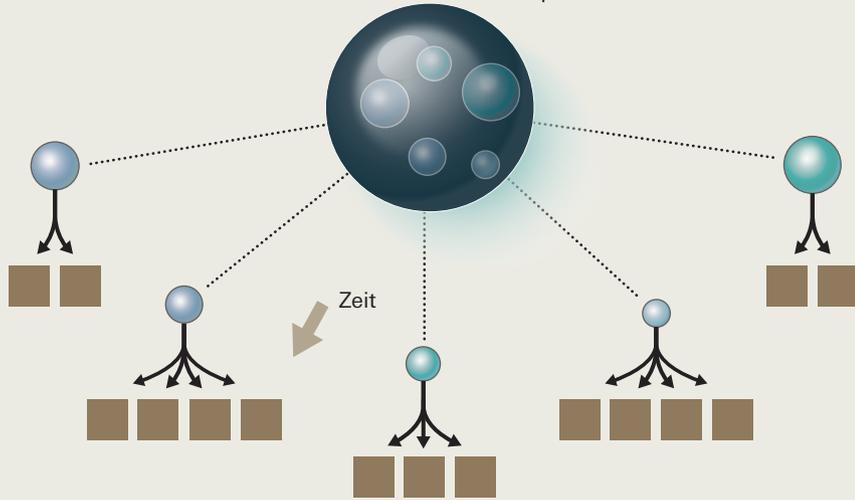
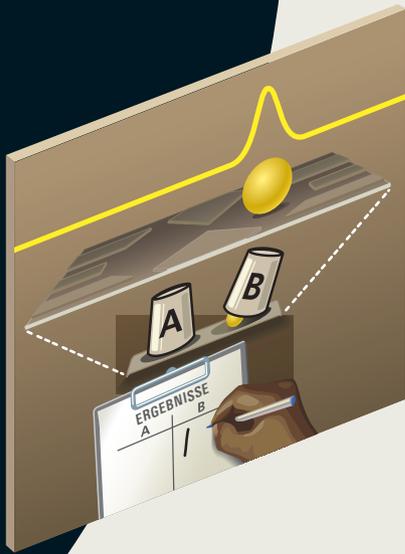
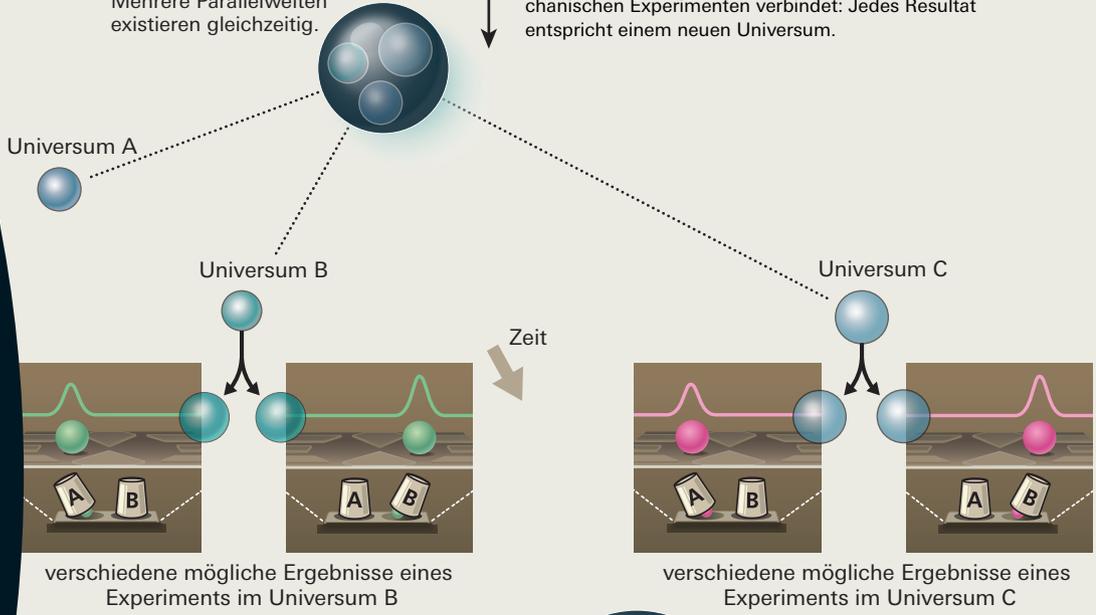


Zeit

### Makro-Mikro-Synthese

Das inflationäre Multiversum und die Viele-Welten-Interpretation könnten dasselbe sein, wenn man das Entstehen neuer Parallelwelten mit quantenmechanischen Experimenten verbindet: Jedes Resultat entspricht einem neuen Universum.

Überlagerung von Zuständen:  
Mehrere Parallelwelten existieren gleichzeitig.



extrem verzerrter Raumzeit, in denen enorme Anziehungskräfte jedes hineinstürzende Objekt daran hindern, wieder herauszukommen. Sie sind ein idealer theoretischer Spielplatz, um zu untersuchen, was passiert, wenn sowohl Quanteneffekte als auch die Gravitation groß werden.

Angenommen, wir werfen ein Buch in ein Schwarzes Loch und beobachten den Vorgang von außen. Zwar kann das Buch nicht mehr entkommen, doch die darin gespeicherte Information muss aus quantentheoretischen Gründen erhalten bleiben. Außerdem verdampft das Schwarze Loch allmählich, denn es verliert nach allem, was wir wissen, unablässig Energie in Form von schwacher Strahlung, die nach dem Physiker Stephen Hawking von der University of Cambridge benannt ist. Ein Beobachter kann die im Buch enthaltene Information rekonstruieren, wenn er die Hawking-Strahlung genau beobachtet. Jedes Lichtteilchen sollte ein kleines Stück der Information enthalten.

Für jemanden, der zusammen mit dem Buch in das Schwarze Loch stürzt, unterscheidet sich die Situation

Sichtweisen gibt es keine Inkonsistenzen, solange man nicht versucht, beide zu verbinden. Das ist physikalisch auch gar nicht sinnvoll, da man nicht gleichzeitig hineinfallender und außen stehender Beobachter sein kann.

### Es gibt keine Raumzeit jenseits der Gefilde, die wir beobachten können

Dieser Ausflug zu den Schwarzen Löchern kann uns helfen, die Verbindung zwischen der Viele-Welten-Interpretation und dem Multiversum zu verstehen. Es scheint nämlich so, als wäre der Rand eines Schwarzen Lochs in vielerlei Hinsicht mit dem verwandt, was Astronomen den Beobachtungshorizont nennen. Dabei handelt es sich um die Grenze zu jenen entfernten Raumgegenden, aus denen wir keine Signale mehr empfangen können. Es gibt diesen kosmologischen Horizont, weil sich das Weltall ausdehnt und sich die jenseitige Raumzeit mitsamt aller enthaltener Objekte und Information schneller von uns entfernt als mit Lichtgeschwindigkeit. Von dem, was hinter der Grenze passiert, werden wir nie erfahren. In gewisser Weise entspricht die Situation also dem äußeren Beobachter eines Schwarzen Lochs. Analog zur Hawking-Strahlung zwingt uns die Quantenmechanik auch in diesem Fall, alles hinter dem Horizont als nichtexistent anzusehen. Denn wenn wir eine solche Raumzeit der anderen Seite zusätzlich zu dem berücksichtigen, was wir aus dem kosmologischen Horizont selbst prinzipiell rekonstruieren können, zählen wir Information doppelt. Dieses Problem verdeutlicht: Jede Formulierung des Quantenzustands des Universums darf nur das Gebiet innerhalb und einschließlich des Beobachtungshorizonts berücksichtigen. Insbesondere kann es in einer einzigen, konsistenten Beschreibung keine unendlich großen Raumregionen geben.

Aber wenn ein Quantenzustand nur den Bereich innerhalb des Horizonts darstellt, wo ist dann das Multiversum, von dem wir dachten, es bestünde aus einem grenzenlosen Raum, der sich inflationär ausdehnt? Die Erzeugung von Tochteruniversen ist ebenso den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit unterworfen wie jeder andere quantenmechanische Vorgang. Genau wie wir beim Messen eines einfachen Quantensystems verschiedene Ausgänge mit individueller Eintrittshäufigkeit erwarten, könnte die Inflation mehrere Universen hervorbringen, jedes mit seiner eigenen Wahrscheinlichkeit. Mit anderen Worten: Der Quantenzustand des endlos inflationär expandierenden Raums ist eine Superposition unterschiedlicher Welten. Jede der möglichen Abzweigungen steht für ein individuelles Universum und enthält nur die Region innerhalb ihres eigenen Horizonts.

Das führt uns zurück zum eingangs erläuterten Problem der Unvorhersagbarkeit, das aus der unendlichen Raumzeit und allen möglichen Ausgängen darin entstanden ist. Selbst wenn wir den Quantenzustand des Multiversums in einer zunächst endlichen Region untersuchten, würde diese expandieren und mit der Zeit über alle Maßen wachsen. Wenn jedes Quantenuniversum begrenzt bleibt, umgehen wir diese Schwierigkeiten. Dann können wir das ganze System quantenmechanisch aus der Perspektive eines einzelnen, zentralen Beobachters und dessen Umgebung beschreiben und müssen die Raumzeit nicht künst-



SPÉKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

### Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

jedoch auf verblüffende Weise. In diesem Fall scheint das Buch einfach durch den Horizont des Schwarzen Lochs zu fallen und dort zu verweilen. Für einen Beobachter auf der Innenseite bleibt das Buch erhalten. Für einen auf der Außenseite löst es sich auf und tröpfelt heraus. Welche der beiden Sichtweisen trifft nun zu? Man könnte vermuten, die Information würde einfach dupliziert – eine vollständige Kopie für jeden Standpunkt. Doch das verbietet das so genannte No-Cloning-Theorem der Quantenmechanik. Darum scheinen beide Sichtweisen unvereinbar zu sein.

Der Physiker Gerard 't Hooft von der Universität Utrecht in den Niederlanden hat zusammen mit Susskind und weiteren Kollegen eine Lösung vorgeschlagen. Demnach können durchaus beide Bilder gültig sein, nur nicht zur gleichen Zeit. Einerseits ist einem äußeren Beobachter die Information zugänglich, gerade weil das Innere des Schwarzen Lochs für ihn prinzipiell nicht erreichbar ist und er es darum auch nicht beschreiben kann. Tatsächlich muss er sogar, um das Kopieren von Informationen zu vermeiden, alles jenseits des sichtbaren Horizonts als gänzlich nichtexistent betrachten. Andererseits reduziert sich für jemanden, der in das Schwarze Loch stürzt, die gesamte Welt auf dessen Inneres. Dort befindet sich das Buch mit all seiner Information. Diese Perspektive kann man nur einnehmen, wenn man die emittierte Hawking-Strahlung ignoriert, doch das ist möglich, weil man eingeschlossen und von ihr abgeschirmt ist. Zwischen den

lich beschneiden. In gewisser Weise existiert die Raumzeit analog zum Schwarzen Loch überhaupt nur insoweit, wie sie für diesen Beobachter zugänglich ist. Dafür gibt es die Paralleluniversen nicht alle gleichzeitig im realen Raum – sie koexistieren nur in einem abstrakten Wahrscheinlichkeitsraum. Jedes Universum steht für das Resultat einer Messung innerhalb der einzelnen Welten und erhält auf dem Weg eine bestimmte Wahrscheinlichkeit, Wirklichkeit zu werden. Im Grunde gibt es nur einen einzigen Quantenzustand des Multiversums, der sich mit der Zeit entwickelt.

Dieses Bild vereint die Inflationstheorie der Kosmologen und Everetts Interpretation. Die Geschichte des Kosmos liest sich dann so: Das Multiversum beginnt mit einem Anfangszustand und wird zu einer Superposition vieler Tochteruniversen. Im Lauf der Zeit verästeln sich die Zustände, die jene Welten repräsentieren, und führen zu einer Überlagerung aller möglichen Ausgänge von Experimenten innerhalb dieser Universen. Damit sind nicht bloß Laborversuche gemeint, sondern ein Experiment kann jeder physikalische Prozess sein. Schließlich enthält der Zustand des gesamten Multiversums eine enorme Anzahl an Zweigen, von denen jeder für eine mögliche Welt steht, die sich aus dem Anfangszustand entwickeln könnte. Quantenmechanische Wahrscheinlichkeiten bestimmen dann sowohl kosmologische wie mikroskopische Vorgänge. Das Multiversum und die vielen Welten der Quantenmechanik basieren auf demselben Phänomen, nämlich Superposition – lediglich auf ganz verschiedenen Skalen. In diesem neuen Bild ist unsere Welt lediglich eine von allen möglichen, die gemäß den fundamentalen Gesetzen der Quantenphysik erlaubt sind und die nebeneinander im Wahrscheinlichkeitsraum existieren.

### **Falls unser Universum nicht ganz flach ist, würde das die Vorstellung untermauern oder widerlegen**

Sind Experimente denkbar, mit denen wir überprüfen könnten, ob diese Idee zutrifft? Das Multiversum könnte zu einer geringen negativen Krümmung unseres Kosmos führen. Das bedeutet, Objekte würden sich nicht auf geraden Linien durch die Raumzeit bewegen wie bei einem flachen Universum, sondern auf leicht gebogenen Bahnen, selbst in der Abwesenheit von Schwerkraft. Ein alltägliches Beispiel für eine negative Krümmung ist die Fläche eines Sattels, während die Oberfläche einer Kugel positiv gekrümmt ist. Der tiefere Grund für eine solche negative Krümmung wäre, dass die Tochteruniversen aus Sicht des gesamten Multiversums zwar endlich sind, Beobachter innerhalb einer dieser Welten ihr Universum jedoch als unendlich groß wahrnehmen würden.

Bisherige Beobachtungsdaten legen nahe, dass der Kosmos flach ist. Experimente, die untersuchen, wie sich Licht von weit entfernten Quellen durch die Raumzeit bewegt, werden die Genauigkeit solcher Messungen im Verlauf der nächsten Jahrzehnte vermutlich um etwa zwei Größenordnungen verbessern. Sollte dabei eine noch so geringe negative Krümmung auftauchen, würde das die Argumentation der Anhänger eines Multiversums unterstützen. Insbesondere das Quanten-Multiversum könnte zu einem Effekt führen, der gerade groß genug ist, um ihn

zu registrieren. Traditionelle Vorstellungen des inflationären Multiversums erzeugen hingegen eher noch geringere negative Krümmungen.

Eine positive Krümmung hingegen würde das Quanten-Multiversum falsifizieren – so etwas wäre im hier dargestellten Modell nicht möglich. Sollten wir großes Glück haben, könnten wir im Prinzip sogar Überreste vergangener Kollisionen zweier Tochteruniversen aufspüren, die aus dem gleichen Zweig des Multiversums entstanden sind. Die meisten Wissenschaftler halten derartige Beobachtungen aber für wenig wahrscheinlich.

Zusammen mit anderen Physikern verfolge ich die Idee auf einer theoretischen Ebene weiter und hoffe, den Antworten auf fundamentale Fragen etwas näher zu kommen: Wie könnten wir den Quantenzustand des gesamten Multiversums bestimmen? Was ist Zeit, und wie entsteht sie? Das Quanten-Multiversum ist eine neue Art, solche Probleme anzugehen. So habe ich beispielsweise entdeckt, dass gewisse Randbedingungen, die nötig sind, um Wahrscheinlichkeiten mathematisch streng zu definieren, uns näher an eine Beschreibung des Quantenzustands führen könnten. Diese Bedingungen scheinen auch zu implizieren, dass der Gesamtzustand des Universums unverändert bleibt, selbst wenn ein Beobachter als Teil des Multiversums ständig neu entstehende Tochteruniversen sieht. Möglicherweise ist darum unser Eindruck, das All würde sich im Lauf der Zeit verändern, eine Illusion – oder gar das Konzept der Zeit selbst. Sie könnte sich als nicht viel mehr als ein nützliches Konstrukt erweisen, ein Hilfsparameter, mit dem wir korrelierende Ereignisse in lokalen Zweigen des Multiversums ordnen.

Das ist freilich äußerst spekulativ. Dennoch ist es anregend, dank theoretischer Fortschritte nun über solche tief schürfenden Fragen nachdenken zu können. Wo auch immer diese Ideen uns hinführen, reichen sie auf jeden Fall weit aus unserer eigenen, erfahrbaren Umgebung hinaus – in eine potenziell grenzenlose Welt. ◀

### QUELLEN

**Bousso, R., Susskind, L.:** Multiverse Interpretation of Quantum Mechanics. In: *Physical Review D* 85, 045007, 2012; arXiv:1105.3796

**Guth, A. H., Nomura, Y.:** What Can the Observation of Nonzero Curvature Tell Us? In: *Physical Review D* 86, 023534, 2012; arXiv:1203.6876

**Nomura, Y.:** Physical Theories, Eternal Inflation, and the Quantum Universe. In: *Journal of High Energy Physics* 63, 2011; arXiv:1104.2324

**Nomura, Y.:** Quantum Mechanics, Gravity, and the Multiverse. In: *Astronomical Review* 7, 2012; arXiv:1205.2675

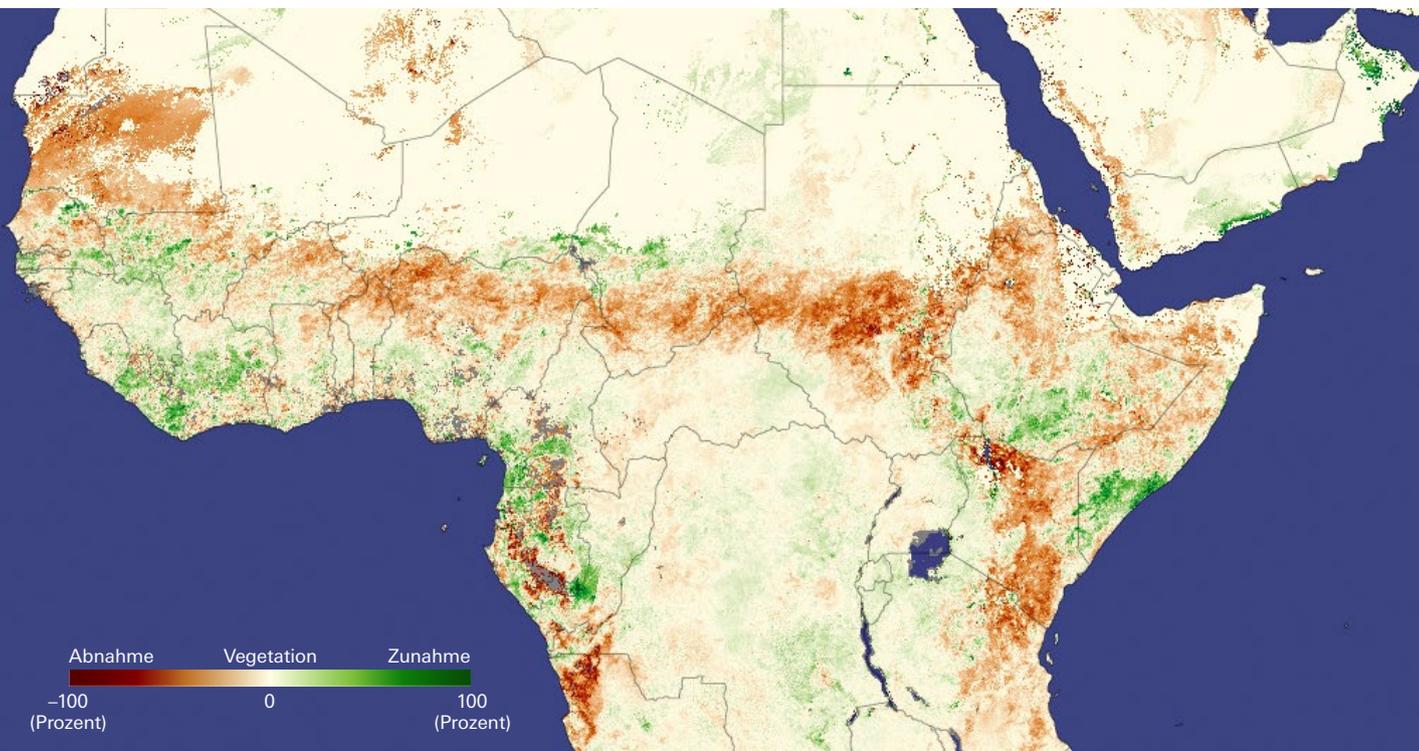
**Nomura, Y.:** The Static Quantum Multiverse. In: *Physical Review D* 86, 083505, 2012; arXiv:1205.5550

### LITERATURTIPPS

**Ellis, G.F.R.:** Multiversum in Beweisnot. In: *Spektrum* November 2011, S. 36–42

*Kritische Untersuchung der Argumente für ein Multiversum*

**Tegmark, M.:** Paralleluniversen. In: *Spektrum* August 2003, S. 34–45  
*Ausführliche Darstellung verschiedener denkbarer Typen paralleler Welten*



**Südlich der Sahara durchzieht ein Band fruchtbarer Graslands Afrika: die Sahelzone. Fällt dort zu wenig Regen, kommt es leicht zu Dürren. So wie im Juni 2009, als saisonale Niederschläge ausblieben und Pflanzen vielerorts deutlich langsamer wuchsen als in den fünf Jahren zuvor (braune Farbtöne).**

## METEOROLOGIE WIE VIEL REGNET ES IM SAHEL?

**Südlich der Sahara kommt es immer wieder zu schweren Dürren. Wissenschaftler können die Niederschläge dort nun genauer prognostizieren als zuvor. Eine andere Studie liefert derweil ein überraschendes Ergebnis: Heftige Regenfälle nehmen in der Sahelzone zu.**

Seit den verheerenden Dürren in den 1970er und 1980er Jahren haben sich viele Länder der Sahelzone ökonomisch erholt. Aber lange Trockenperioden können dort nach wie vor katastrophale Folgen haben, etwa Missernten. Fehler in der Landwirtschaft, die wachsende Bevölkerung und politische Konflikte verschärfen das Problem noch.

Umgekehrt richtet in der streifenförmigen Übergangszone von Sahara zu Savanne manchmal auch ein Zuviel an Regen leicht Schaden an. In letzter Zeit sind Forschern mehrere Fortschritte bei der langfristigen Prognose von Niederschlägen im Sahel gelungen sowie beim Verständnis von Mechanismen, die diese beeinflussen. Auf diese Weise können die Wissenschaftler Vorhersagen für die

nächsten Monate bis Jahre verfeinern – und den Einwohnern helfen, sich auf Wetterextreme und Klimawandel besser vorzubereiten.

Der meiste Regen fällt im Sahel zwischen Juni und Oktober, wenn sich die innertropische Konvergenzzone – das wichtigste tropische Regenband – nach Norden verlagert. In manchen Jahren bringen die Wolken aber deutlich weniger Niederschlag. Meteorologen versuchen schon seit vielen Jahren, die resultierenden Dürreperioden früh vorherzusagen. Ein Team um Katy Sheen am Met Office im englischen Exeter ist in dieser Hinsicht jetzt ein gutes Stück weitergekommen.

Die Forscher können mit ihrem Modell schon im Winter den Regen des nächsten Sommers deutlich verlässlicher prognostizieren, als dies bisher möglich war. Auch den Niederschlag innerhalb der jeweils bevorstehenden zwei bis fünf Jahre schätzen sie ab. In beiden Fällen bleibt das Risiko zwar immer noch recht hoch, dass die Vorhersage danebengeht. Das ist für solche langen Zeiträume aber typisch.

Das Team hat kein herkömmliches Modell zur Wettervorhersage verwendet, sondern ein besonders komplexes namens Depresys3 (»Decadal Climate Prediction System 3«). Neben der Veränderung in der Atmosphäre lässt sich damit auch die des Ozeans berechnen. Das ist essenziell für die Prognose von Entwicklungen über Monate und Jahre hinweg. Denn im Ozean hinterlässt das Wetter der Vergangenheit lang andauernde Spuren, die dann irgend-

wann in Form von Temperaturanomalien wieder auf die Atmosphäre zurückwirken.

Besonders anspruchsvoll bei der Arbeit mit derartigen Atmosphäre-Ozean-Modellen zur Witterungsvorhersage ist es, die Startbedingungen einer Simulation festzulegen. Sie umfassen die gemessenen Temperaturen und Salzgehalte des Meerwassers ebenso wie Messdaten zum Meereis. Dass der Salzgehalt berücksichtigt werden muss, erscheint vielleicht überraschend. Es liegt daran, dass er zusätzlich zur Temperatur die Wasserdichte beeinflusst und darum Meeresströmungen verändern kann. Das wirkt sich dann auch auf das Wetter aus.

### **Mit dem Modell hätte man die verheerenden Dürren der 1980er Jahre vorhersagen können**

Getestet wurde das Modell Depresys3 anhand so genannter »Hindcasts«; das sind Blindvorhersagen für Daten der Vergangenheit. Die Forscher rechneten Regenvorhersagen auf der Basis von Messdaten aller Sommer seit 1960 durch und verglichen sie mit den tatsächlichen Werten. Wie sich zeigte, waren die Vorhersagen treffsicherer als alle mit sonstigen Modellen errechneten. Das Modell verbessert damit die saisonale Vorhersage des Sommerregens mit Start im Winter deutlich. Auch die Vorhersage der Regenmenge zwei bis fünf Jahre nach dem Startpunkt der Simulation war verlässlicher als bisher.

Das Fazit der britischen Meteorologengruppe: Man hätte die verheerenden Dürren der 1970er und 1980er Jahre vorhersagen können, wenn damals das Modell Depresys3 zur Verfügung gestanden hätte. Entscheidend für die Verbesserung der Prognosegüte sind laut Sheen die genauer vorhergesagten Meerestemperaturen. In ihrer Studie haben die Forscher daher auch untersucht, wie die Wärme im Ozean den Regen im Sahel beeinflusst.

Die dafür relevanten Meeresgebiete unterscheiden sich demnach je nach Vorhersagezeitraum. Will man im Winter die Niederschläge des kommenden Sommers berechnen, wirken sich vor allem die Temperaturen im tropischen Pazifik und im Indischen Ozean aus. Die von den beiden Ozeanen ausgelösten Wärmeflüsse steuern Höhenwinde, die Schauer und Gewitter im Sahel hervorrufen oder unterdrücken können.

Für Vorhersagen zwei bis fünf Jahre in die Zukunft waren hingegen der Nordatlantik und das Mittelmeer am wichtigsten. Ein warmer Nordatlantik zieht die innertropische Konvergenzzone nach Norden. In der Folge regnet es im Sahel mehr. Sind sowohl der Nordatlantik als auch das Mittelmeer ungewöhnlich warm, verdunstet in beiden Regionen mehr Wasser. Das bringt mehr feuchte Luft in die Sahelzone und macht dort außerdem die vertikale Schichtung der Luftmassen labiler – dadurch werden Schauer und Gewitter wahrscheinlicher.

Bessere Vorhersagen wären nicht nur hilfreich, um sich gegen Dürren zu wappnen. Immer öfter kommt es im Sahel auch zu Überschwemmungen durch extreme Regenfälle – zuletzt in Niger, Mali, Burkina Faso und Senegal im Sommer 2016. Es könnte sich dabei um einen langfris-

tigen Trend handeln, berichtete vor Kurzem ein Team um Christopher Taylor vom britischen National Centre for Earth Observation.

Seit dem Jahr 1982 habe die Zahl extrem heftiger Regengüsse im Westsahel stark zugenommen, schreiben die Forscher. Sie haben Satellitendaten ausgewertet und so Regenunwetter im Westen der Sahelzone anhand von Lufttemperaturen an der Oberseite der Wolken rekonstruiert. Sensoren von Wettersatelliten fangen Infrarotstrahlung auf, die von dort abgestrahlt wird. Je höher sich die Schauer- oder Gewitterwolke auftürmt, desto kräftiger das Unwetter und kälter die eisige Wolkenoberseite.

Das Interesse der Wissenschaftler galt vor allem »mesoskaligen konvektiven Systemen« (MCS). Das sind große zusammenhängende Gewitterkomplexe mit einer Fläche von mindestens 25 000 Quadratkilometern. Der Studie zufolge hat sich die Zahl der MCS mit einer Temperatur von minus 70 Grad Celsius oder weniger an der Wolkenoberseite seit 1982 mehr als verdreifacht. Dabei spielen mehrere Ursachen eine Rolle. Für die wichtigste hält das Team die Erwärmung der Sahara. Der Temperaturanstieg über der Wüste habe die Windscherung verstärkt, also die Veränderung von Windstärke oder -richtung mit der Höhe.

Schon lange wissen Meteorologen, dass eine starke Windscherung die Lebensdauer und die Stärke von MCS erhöht. Außerdem hat die Erwärmung der Sahara die

## **Wie sich der Klimawandel auf die Niederschläge im Sahel auswirken wird, ist noch unklar**

relative Feuchte mittlerer Luftschichten gesenkt und damit die Entstehung kleinerer Komplexe von Schauern oder Gewittern verhindert. Dieser Effekt führt paradoxerweise dazu, dass sich umso größere Gewitterkomplexe bilden, wenn die Bedingungen doch einmal günstig sind. Zusammengefasst haben diese Veränderungen die Heftigkeit der MCS deutlich erhöht. Taylor hält es des Weiteren für plausibel, dass die MCS im Sahel mit der globalen Erwärmung weiter zunehmen werden. Das schließt künftige Dürreperioden freilich nicht aus.

Unter den schwierigen Wetterbedingungen der Sahelzone leben bereits heute 80 Millionen Menschen. In Zukunft wird diese Zahl wegen den hohen Geburtenraten in der Region stark ansteigen. Wie sich Regenmenge und Art der Niederschläge in den kommenden Jahrzehnten und Jahrhunderten verändern, ist noch ungewiss. Der UN-Klimarat IPCC blieb in seinem jüngsten Sachstandsbericht mit Blick auf diese Frage im Ungefähren. Und das aus gutem Grund.

Entscheidend für die Regenbildung ist neben der atmosphärischen Zirkulation und der Luftfeuchte auch die Feuchtigkeit des Erdbodens. Wie gut die Klimamodelle die

Bodenfeuchte wiedergeben, beeinflusst daher stark, wie verlässlich klimatische Veränderungen von Regenmengen vorhergesagt werden können. Ein Forscherteam um Alexis Berg von der Princeton University zeigte neulich: Klimamodelle weisen im Hinblick auf den Effekt der Bodenfeuchte noch sehr unterschiedliche Resultate auf.

Generell verstärkt eine höhere Feuchtigkeit die Neigung zu neuen Niederschlägen. Im Sahel ist die Lage aber komplizierter. Denn die Bodenfeuchte wirkt sich auf regionale Differenzen der Temperatur aus; diese beeinflussen ihrerseits die Regenbildung. Hier müssen die Modelle also offenbar noch deutlich verfeinert werden.

Katy Sheen vom Met Office plant derweil eine Reise in den Senegal und nach Ghana. Dort will sie von Meteorologen in lokalen Wetterzentren und Forschungsinstituten erfahren, wie diese Witterungsvorhersagen konkret nutzen – und auf welche Informationen es am meisten ankommt. Die besten Vorhersagen sind schließlich wertlos, wenn die Bewohner der Sahelzone keinen Gewinn daraus ziehen können. ◀

**Sven Titz** ist promovierter Meteorologe und als Wissenschaftsjournalist in Berlin tätig.

## QUELLEN

**Berg, A. et al.:** Geophysical Research Letters 44, 073851, 17.6. 2017

**Sheen, K.L. et al.:** Nature Communications 8, 14966, 25.5. 2017

**Taylor, C. et al.:** Nature 544, S. 475–478, 27.4. 2017

## MOLEKULARBIOLOGIE PROTEINSCHICKSALE

**Verblüffenderweise nimmt die Haltbarkeit mancher Eiweißmoleküle mit ihrem Alter zu.**

► Unsere Zellen bilden laufend neue Proteine – und entsorgen die nicht mehr benötigten. Deren »Lebensdauer« ist aber sehr verschieden und von ihrer Funktion abhängig. Kurzlebige Eiweißstoffe werden in speziellen hohlen Proteinkomplexen, den so genannten Proteasomen abgebaut und existieren oft nur für ein paar Minuten. Viele von ihnen wirken bei der Zellteilung mit. Hingegen bleiben manche Strukturproteine über Jahre stabil. Deren Entsorgung betreiben in der Regel Autophagosomen: quasi molekulare Müllsäcke, die Proteinüberreste zunächst einpacken und anschließend zur zellulären Recyclinganlage bringen, den Lysosomen, wo Enzyme sie in ihre Einzelteile zersetzen.

Für die Daseinsdauer eines Proteins kommt es allerdings auch darauf an, wie leicht die Zelle es zu produzieren und zusammenzubauen vermag. Das riesige, komplizierte Protein CFTR etwa faltet sich so langsam, dass Proteasomen es manchmal schon wieder vernichtet haben, bevor es überhaupt in Funktion treten kann. Denn sie halten das noch unfertige Molekül für fehlerhaft. Erst in

seiner endgültigen Konformation bildet es jenen wichtigen Chloridkanal in Zellmembranen, der bei Mukoviszidose (zystische Fibrose) defekt ist.

Im Jahr 2000 kamen Forscher um Jonathan Yewdell und Jack Bennink vom National Institute of Allergy and Infectious Diseases der USA in Bethesda (Maryland) zu dem Schluss, dass menschliche Zellen 30 Prozent ihrer Proteine falsch zusammenbauen und sofort wieder zerlegen. Fünf Jahre später ermittelten Ulrich Hartl und sein Team vom Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried bei München allerdings einen deutlich kleineren Anteil, nämlich einige wenige Prozent. So viel steht zumindest fest: Unsere Zellen machen fortlaufend Produktionsfehler und sortieren viele frisch gebackene Proteine gleich wieder aus.

Doch was passiert mit denen, die den Herstellungsprozess unbeschadet überstanden haben? Um das zu klären, haben der Biochemiker Matthias Selbach vom Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in Berlin und seine Mitarbeiter erstmals den Lebenszyklus fast aller Proteine menschlicher Zellen verfolgt – mehr als 4000 an der Zahl.

Um frisch gebildete Eiweißstoffe überhaupt von anderen unterscheiden zu können, entwickelten die Forscher eine spezielle Markierungsmethode: Menschliche Bindegewebszellen versetzten sie eine Stunde lang mit einer synthetischen Aminosäure, die in Zellen sonst nicht vorkommt, die diese nun aber in alle neuen Proteine einfügten. Das weitere Schicksal der Eiweißstoffe ließ sich dann mit verschiedenen üblichen Nachweisverfahren wie der Massenspektrometrie verfolgen. So konnten die Forscher genau messen, wie viele der neuen Proteine zu unterschiedlichen Zeitpunkten noch übrig waren.

Wie sich zeigte, wurden die meisten von ihnen mit einer bestimmten, je nach spezifischem Protein individuellen konstanten Rate abgebaut (auf die Gesamtkonzentration bezogen exponentiell). Etwa 15 Prozent der neu gebildeten Eiweißstoffe fielen allerdings aus dem Rahmen: Sie wurden mit zunehmendem Alter immer stabiler oder besser gesagt, gerieten verhältnismäßig immer seltener in die Fänge der Abbaumaschinerie. Selbach nennt sie NED-Proteine (für non-exponentially degraded). Dabei hat

## Ein kleiner Teil der neuen Proteine gerät mit zunehmendem Alter immer seltener in die Fänge der Abbaumaschinerie

es gerade diese Fraktion zu Anfang offenbar besonders schwer, denn viele von ihnen überleben die ersten Stunden nach ihrer Synthese nicht. War die kritische, empfindliche Phase jedoch erst einmal überwunden, behaupteten sich solche Moleküle bestens. Und als die Forscher gleich zu Anfang einen Proteasomenhemmer zu den Zellen hinzugaben, sammelten sich in ihnen plötzlich verstärkt NED-Proteine an. Demnach dürften die Proteasomen für deren frühe Entsorgung verantwortlich sein.

Selbach glaubt mit diesen Befunden ein Phänomen erklären zu können, das die Zellbiologin Zuzana Storchova Jahre zuvor beobachtet hatte, als sie am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried bei München arbeitete. So genannte aneuploide Zellen enthalten nicht die reguläre Anzahl von Chromosomen, Menschen mit Down-Syndrom haben zum Beispiel eines zu viel. Bei einer Überzahl entstehen meist auch mehr von den im betreffenden Chromosom kodierten Proteinen als in gesunden Zellen. Doch wie Storchova 2012 entdeckte, betrifft das nicht alle jene Eiweißmoleküle. Manche davon sind nicht in solchen Mengen vorhanden, wie die Forscher bei einer derart hohen Chromosomenzahl erwarten würden.

### Wie wirken sich überzählige Chromosomen in Krebszellen auf das Tumorwachstum aus?

Selbach hatte nun den Verdacht, dass es sich hierbei um NED-Proteine handeln könnte. Also suchte er die Zusammenarbeit mit Storchova, bei der ich damals forschte. Wir konstruierten daraufhin künstlich aneuploide Zellen. Und zwar holten wir aus menschlichen Zellen einzelne Chromosomen heraus und fügten diese in intakte Zellen ein. Viele Eiweißmoleküle erschienen nun wie erwartet im Übermaß, doch NED-Proteine waren tatsächlich nicht darunter. Dabei produzieren aneuploide Zellen auch sie zunächst in hohen Mengen, doch offenbar werden sie sogleich verstärkt wieder abgebaut.

Die Entdeckung der NED-Proteinfraktion ist besonders für die Krebsforschung wichtig, denn entartete Zellen besitzen oft mehr Chromosomen als normal. Mediziner möchten besser verstehen, wie sich das auf die Proteinproduktion, -regulation und damit das Tumorwachstum auswirkt.

Doch warum stellen Zellen aufwändige Moleküle her, nur um viele davon gleich wieder zu vernichten? Sind die unfertigen Produkte vielleicht Reserven für den Bedarfsfall? Wissenschaftler vermuten seit Jahrzehnten, dass die Teilproteine von großen Komplexen nah bei ihren Bindungspartnern stabiler sind als für sich allein. Demnach wären sie erst in dem funktionalen Komplex beständig. Und innerhalb dieser Struktur können Proteasomen sie nicht angreifen. So ließe sich erklären, wieso gerade die komplizierten Eiweißverbindungen erst mit der Zeit stabiler werden. Ein Beispiel dafür sind die Ribosomen genannten Proteinfabriken – große Verbände aus jeweils dutzenden Einzelproteinen, in denen Aminosäuren zu Ketten zusammengefügt werden.

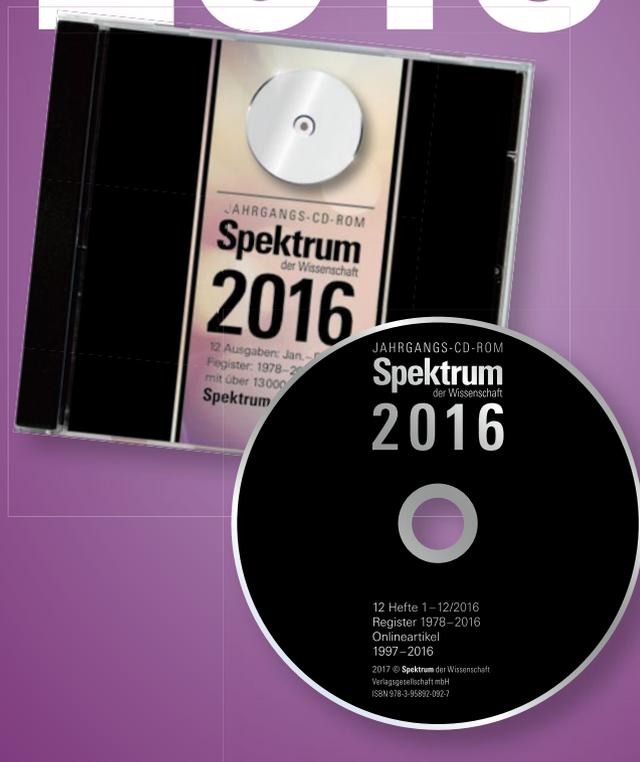
Wie Selbach und sein Team erkannten, formen mehr als zwei Drittel der NED-Moleküle tatsächlich Proteinkomplexe, und oft bilden sie sogar deren Kern. Wie sich die mit dem Alter zunehmende Stabilität des übrigen Drittels erklärt, ist allerdings noch ein Rätsel. ◀

**Neysan Donnelly** ist promovierter Biochemiker und wissenschaftlicher Lektor und Autor in Lindau am Bodensee.

#### QUELLE

**McShane, E. et al.:** Kinetic Analysis of Protein Stability Reveals Age-Dependent Degradation. In: Cell 167, S. 803–815.e21, 2016

# JAHRGANGS 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](http://www.spektrum.de/recherche)  
[service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)**

## MESSTECHNIK PRÄZISION JENSEITS DES QUANTENLIMITS

**Quanteneffekte begrenzen die erreichbare Genauigkeit miniaturisierter Sensoren. Ein trickreiches System könnte diese fundamentalen Einschränkungen umschiffen – indem sich ein Teil von ihm verhält wie eine negative Masse.**

► Auf der Quantenebene kann bereits der schiere Akt des Hinschauens dramatische Konsequenzen haben. Das ist nicht nur im bekannten Gedankenexperiment mit Schrödingers Katze unter Umständen fatal, sondern wirkt sich ganz praktisch umso störender aus, je empfindlicher die Messtechnik wird. Ein Forscherteam um Christopher Møller vom Niels-Bohr-Institut an der Universität Kopenhagen hat nun gezeigt, dass sich die lästigen Effekte durch ein Quantensystem mit einer Art negativer Masse reduzieren lassen. Wenn diese angestoßen wird, bewegt sie sich im krassen Widerspruch zu unserer alltäglichen Erfahrung entgegen der Beschleunigungsrichtung. Das seltsame Verhalten könnte sich für Sensoren ausnutzen lassen, die ihrerseits die fundamentalen Grenzen der Quantenphysik umgehen.

Bewegungssensoren sind für moderne Technik unverzichtbar, von Smartphones bis zur biomedizinischen Diagnostik. Sie ermitteln unsere Lage und Geschwindigkeit, und Forscher verfolgen mit ihnen das Verhalten von Molekülen und Teilchen. Ein aktuelles Beispiel, wie weit uns höchst präzise Mikromechanik bringt, liefern die Gravitationswellen: Mit ausgeklügelten Anordnungen von

### Durch geschickt konzipierte Experimente lässt sich sogar die Unschärferelation umgehen

Spiegeln und Lasern empfangen Astronomen inzwischen Signale von Schwarzen Löchern in Milliarden Lichtjahren Entfernung.

Alle solchen Systeme enthalten Bauteile, die von äußeren Reizen in eine Schwingung versetzt werden. Diese Vibration wird üblicherweise mit Hilfe eines elektromagnetischen Felds ausgelesen, indem etwa Licht oder Mikrowellen vom Sensor reflektiert werden. Durch die rasanten nanotechnologischen und optoelektronischen Fortschritte sind die Sensoren mittlerweile bis zu einem Grad miniaturisiert, an dem quantenmechanische Effekte ihr Verhalten stark beeinflussen.

Wenn ein elektromagnetisches Feld auf die Oberfläche trifft, überträgt es per Strahlungsdruck einen Impuls auf den Sensor. Den Effekt kennen wir zwar nicht aus dem

Alltag, aber wir können ihn etwa bei Kometen beobachten, deren Schweif stets von der Sonne weg zeigt. Ein Grundpfeiler der Quantenphysik ist die Erkenntnis, dass sich die Energie eines elektromagnetischen Felds auf diskrete Einheiten aufteilt, die Photonen. Darum spüren nanomechanische Sensoren keine kontinuierliche Kraft, sondern eine Reihe kleiner Stöße durch Lichtteilchen, die auf die Oberfläche prallen. Da die zeitliche Abfolge dem Zufall unterliegt, fließt eine Unbestimmtheit in den Messprozess ein, die als Quantenrauschen bezeichnet wird.

Dieses Phänomen spielt bei allen quantenmechanischen Messvorgängen eine Rolle und lässt beispielsweise bei Gravitationswellendetektoren schwache Abstandsänderungen der Spiegel im Prasseln der Photonen untergehen. Das Quantenrauschen folgt aus der heisenbergschen Unschärferelation, die besagt, dass wir die Position und den Impuls eines Teilchens niemals gleichzeitig beliebig genau bestimmen können. Da es sich um eine fundamentale Aussage der Quantenmechanik handelt, scheint die Lage ausweglos und Rauschen unvermeidlich. Dennoch lässt sich das Problem durch geschickt konzipierte Experimente umgehen. So ist es möglich, den Ort eines Objekts zu erkennen, ohne Aussagen über seinen Impuls treffen zu müssen. In anderen Fällen lässt sich die Unschärferelation umschiffen, indem man Messungen nicht an einzelnen Teilchen, sondern an mehreren parallel durchführt. Das war auch der Trick der Forscher aus Dänemark.

### Je ein Stoß auf negative und gewöhnliche Masse würden sich genau ausgleichen

Ein hypothetisches Experiment hilft, die Methode zu verstehen. Dazu betrachtet man zwei mechanische Oszillatoren, nämlich Spiegel, die jeweils an einer Feder aufgehängt sind (siehe »Bizarrer Spiegel im Gedankenexperiment«, rechts). Sie reflektieren einen Laserstrahl, mit dem der Abstand zwischen beiden Oberflächen gemessen wird. Jeder Oszillator erhält von den Photonen im Laser ständig kleine Stöße. Da ein Lichtteilchen nacheinander beide Spiegel trifft, sind die Impulse miteinander korreliert. Sie sind gegenläufig und addieren sich, sorgen also für kleine Schwankungen im Spiegelabstand. Wäre es nun möglich, einen der Spiegel durch ein Objekt mit so etwas wie negativer Masse zu ersetzen, würde dieses durch einen Impuls genau in Gegenrichtung beschleunigt. Die Auswirkungen jedes Stoßes glichen sich stets aus, und das Quantenrauschen verschwände.

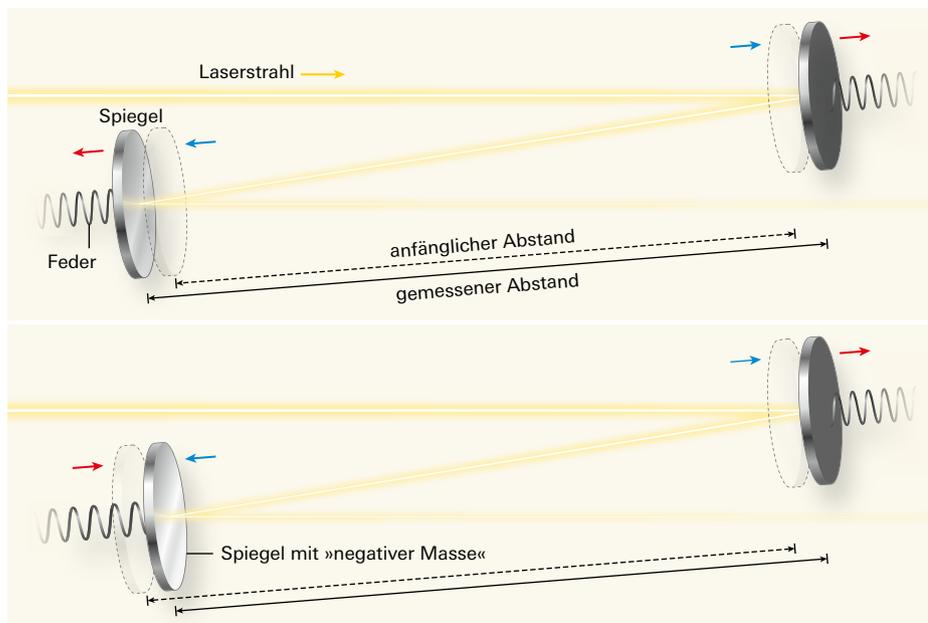
Das klingt wie Sciencefiction. Wie soll etwas eine negative Masse besitzen? Jedoch konnten Wissenschaftler zuvor bereits sowohl theoretisch wie auch in Experimenten zeigen, dass sich Oszillatoren unter gewissen Umständen so verhalten, als hätten sie eine negative Masse, ohne grundlegende physikalische Gesetze zu brechen.

Die Forscher um Møller haben solche Objekte nun genutzt, um das Quantenrauschen zu eliminieren. Ihr Äquivalent einer negativen Masse stammte vom Drehimpuls einer Wolke von Zäsiumatomen. In einem Atom

## Bizarrer Spiegel im Gedankenexperiment

**1** Die Photonen eines Laserstrahls übertragen ihren Impuls (blaue Pfeile) auf zwei frei aufgehängte Spiegel. Diese bewegen sich daraufhin (rote Pfeile), wodurch sich der Abstand zwischen ihnen vergrößert.

**2** Ein hypothetischer Spiegel mit negativer Masse würde in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt werden. Dadurch bliebe die Distanz zwischen ihm und einem herkömmlichen Spiegel stets gleich. Im Laborversuch verwendeten die Forscher den Drehimpuls einer Atomwolke, um eine negative Masse zu simulieren.



BAKER, C.G., BOWEN, W.P.: SENSING PAST THE QUANTUM LIMIT. IN: NATURE 547, S. 164-165, 2017, FIG. 1

trägt jedes Elektron einen so genannten Spin. Dieser quantenmechanische Drehsinn richtet sich stets nach einem äußeren Magnetfeld aus und verhält sich dabei wie ein Oszillator: Kippt man den Spin ein wenig, schwingt er zurück. Mit einer Technik namens optischem Pumpen – eine gezielte Anregung mit speziellem Licht – haben die Wissenschaftler die Orientierung des Gesamtspins der Zäsiumatome umgedreht. Wie die Physiker berechneten, wirkt ein Zäsiumatom mit derart invertiertem Spin auf die Photonen des auftreffenden Lasers wie ein Oszillator mit negativer Masse.

### Das Quantenrauschen verschwand nicht ganz, doch das Prinzip funktioniert

Die Forscher koppelten den Spin über den Lichtstrahl, ähnlich wie in unserem Gedankenexperiment, an einen konventionellen mechanischen Oszillator. Dieser bestand aus einer Membran aus Siliziumnitrid in einem optischen Resonator, bei dem möglichst oft hin- und herlaufendes Licht die Wechselwirkung mit der Membran verstärkte. Im Vergleich zum Aufbau mit einer klassischen positiven Masse war das im Versuch ermittelte Quantenrauschen um 34 Prozent reduziert.

Bereits 2016 haben andere Forscher ein ähnliches Ergebnis mit einem unterschiedlichen Konzept erreicht. Dabei haben sie zwei mechanische Oszillatoren in einem supraleitenden elektrischen Schaltkreis vermessen. Hier waren allerdings extrem tiefe Temperaturen nötig, was praktische Anwendungen erschwert.

Die Rauschminderung ist zwar noch relativ moderat. Doch das Prinzip funktioniert, und es weist einen Weg in Richtung präziserer Sensoren für jegliche Kräfte, die kleinste mechanische Elemente bewegen können. Insbesondere scheint es für Gravitationswellendetektoren der nächsten Generation sinnvoll zu sein.

Darüber hinaus zeigt das Hybridsystem aus Spin und daran gekoppelter mechanischer Membran auf, wie Atome und mikroskopisch kleine Bauteile auf eine quantenmechanische Weise miteinander verbunden werden können. Solche Verschränkungen werden zukünftig außer in der Messtechnik vermutlich im Bereich der Quantenkommunikation und bei Quantencomputern eine wichtige Rolle spielen. ◀

**Warwick P. Bowen** leitet das Labor für Quantenoptik an der University of Queensland in Australien. **Christopher G. Baker** arbeitet dort als Postdoktorand.

#### QUELLEN

**Møller, C. B. et al.:** Quantum Back-Action-Evading Measurement of Motion in a Negative Mass Reference Frame. In: Nature 547, S. 191–195, 2017

**Ockeloen-Korppi, C. F. et al.:** Quantum Backaction Evading Measurement of Collective Mechanical Modes. In: Physical Review Letters 117, 140401, 2016

© Nature Publishing Group  
[www.nature.com](http://www.nature.com)

Nature 547, S. 164–165, 13. Juli 2017

## MEDIZIN RETTUNG FÜR DIE RETINA

**Die Augenkrankheit Retinopathia pigmentosa ist mit bisherigen Therapieverfahren nicht heilbar. Doch mit Hilfe neuer Ansätze lässt sie sich vielleicht zumindest aufhalten.**

Die Tücke einer Retinopathia pigmentosa liegt in ihrem schleichenden Verlauf. Allmählich prägt sich eine Nachtblindheit aus, und das Gesichtsfeld wird kleiner, bis den Betroffenen schließlich nur noch ein kontrastarmer und farbloser Tunnelblick bleibt. Die Ursache dafür ist ein langsames Absterben der Fotorezeptoren der Netzhaut (Retina). An der bislang unheilbaren Krankheit leiden weltweit zirka drei Millionen, in Deutschland etwa 30 000 bis 40 000 Menschen. Verantwortlich sind meist vererbte Gendefekte.

Inzwischen haben Forscher bereits mehrere dutzend Gene identifiziert, die mit der Krankheit assoziiert sind. Viele Therapiekonzepte setzen hier an. Auch mit dem Injizieren von Stamm- oder retinalen Vorläuferzellen haben Mediziner schon experimentiert. Doch diese Methoden sind bislang relativ ineffizient. Ein Team um Mahesh B. Rao von der Vanderbilt University in den USA konzentriert sich bei der Suche nach einem Behandlungsansatz daher auf einen beliebten Aquariefisch, den Zebraäbrbling (*Danio rerio*). Er kann nämlich seine Retina im Fall einer Verletzung regenerieren.

Hinter diesem Selbstheilungseffekt steht der Neurotransmitter  $\gamma$ -Aminobuttersäure, kurz GABA. Er ist in zahlreiche physiologische Prozesse involviert. In der Retina des Zebraäbrblings wirkt GABA inhibierend: Solange er in relativ hoher Konzentration vorliegt, unterdrückt er den Regenerationsprozess. Nimmt der GABA-Spiegel jedoch ab, intensiviert sich die Zellteilung und -vermehrung der so genannten Müller- beziehungsweise der aus diesen hervorgehenden Zellen. Müllerzellen sind Gliazellen, welche die gesamte Netzhaut durchziehen und unter anderem als Lichtleiter wirken. Aus ihnen können neuronale Vorläuferzellen entstehen, die sich wiederum zu Stäbchen weiterentwickeln – Fotorezeptoren, die das Hell-dunkel-Sehen ermöglichen. Stäbchen werden bei einer Retinopathia pigmentosa als Erstes und auch am stärksten in Mitleidenschaft gezogen, während Zapfen (jene Sinneszellen, dank derer wir farbig sehen) im späteren Verlauf der Krankheit absterben.

Empfängt ein Fotorezeptor im Auge des Zebraäbrblings kein Licht, schüttet er Glutamat aus, das die so genannten Horizontalzellen stimuliert. Diese Neurone setzen daraufhin an den Fotorezeptoren in der Umgebung GABA frei, das deren Glutamatausschüttung stoppt. Bei erneuter Beleuchtung des Fotorezeptors setzt dieser kein Glutamat mehr frei, so dass auch die Horizontalzellen kein GABA mehr von sich geben. Sterben die Fotorezeptoren jedoch ab, wird dieser sich regelmäßig wiederholende Vorgang

unterbrochen und der GABA-Pegel sinkt dauerhaft. Rao und seine Kollegen nehmen an, dass die Müllerzellen das registrieren und infolgedessen die Regeneration der Netzhaut starten.

In Experimenten konnten die Forscher zeigen, dass sich der Reparaturmechanismus künstlich in Gang setzen lässt. In intakten Retinae des Zebraäbrblings blockierten sie die Rezeptoren für GABA, so dass der Neurotransmitter nicht mehr an diese binden und seine Wirkung entfalten konnte. 48 Stunden später war eine stärkere Zellteilung und -vermehrung in der Netzhaut nachweisbar als in unbehandelten Retinae.

Im einem zweiten Versuch testeten die Wissenschaftler den umgekehrten Weg: Sie überprüften, ob GABA den natürlichen Reparaturmechanismus beim Zebraäbrbling unterbricht. Zunächst beschädigten sie die Netzhäute von Tieren, indem sie die Stäbchen entfernten. Anschließend gaben sie einen GABA-Agonisten hinzu, also eine Substanz, die den Neurotransmitter imitiert und die gleiche Reaktion wie dieser hervorruft. Als Folge sank die Zellteilungs- und Vermehrungsrate in der Retina – der Reparaturmechanismus stockte. Damit war erwiesen, dass die Netzhautregeneration vom GABA-Spiegel abhängt.

### **Lassen sich die Beobachtungen am Zebraäbrbling auf den Menschen übertragen?**

Möglicherweise kann man auch beim Menschen die Netzhautreparatur starten, wenn es gelingt, die GABA-Konzentration dort lokal zu senken. Allerdings sind die Retinae des Zebraäbrblings und des Menschen sehr unterschiedlich aufgebaut. In der Fischnetzhaut gibt es laut den Forschern möglicherweise eine spezielle Verknüpfung zwischen den Horizontalzellen und den Müllerzellen. Diese wurde bei Säugetieren bisher nicht gefunden. Wie gut sich also eine künstliche Regeneration beim Menschen auslösen lässt, ist unklar. Die Forscher möchten als Nächstes herausfinden, wie sie eine Interaktion zwischen Horizontal- und Müllerzellen künstlich herbeiführen können.

Andere Teams, die über Therapien gegen Retinopathia pigmentosa forschen, setzen dagegen eher beim Ursprung der Erkrankung an: bei den Gendefekten, die die Netzhauterkrankung verursachen. Mit der CRISPR/Cas-Methode verfügen sie inzwischen über ein potentes Werkzeug hierfür. Zu den Forschern, die auf dem Gebiet arbeiten, gehört die Gruppe um Wenhan Yu vom National Eye Institute in Maryland (USA).

Schon länger ist bekannt, dass der Transkriptionsfaktor NRL (Neural Retina-specific Leucine zipper protein) die Entwicklung der Stäbchen steuert, also jenes Zelltyps, der bei Retinopathia pigmentosa als Erstes abstirbt. Würde man diesen Faktor blockieren, so die Überlegung der Forscher, könnte man die Stäbchen vielleicht dazu bringen, sich in Zapfen umzuwandeln, die von der Krankheit erst später beeinträchtigt werden. Dies könnte die Sehfähigkeit der Patienten zumindest länger aufrechterhalten. Zapfen funktionieren zwar nur bei relativ starker Beleuchtung, sofern diese jedoch gewährleistet ist, lässt es sich

# 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](mailto:service@spektrum.de)

[www.spektrum.de/digitalabo](http://www.spektrum.de/digitalabo)





MIRKO ROSENAU / GETTY IMAGES / ISTOCK

**Der Zebraäbrbling ist ein beliebter Zierfisch. Biologen schätzen ihn als Modellorganismus – unter anderem, weil er wichtige Organe nachwachsen lassen kann.**

mit nur diesem Sinneszelltyp gut leben. Denn die Stäbchen tragen bei hellem Tageslicht ohnehin nichts mehr zum Seheindruck bei, da sie extrem lichtempfindlich sind.

Yu und seine Kollegen prüften das, indem sie ein speziell präpariertes CRISPR/Cas9-System am NRL-Gen in Mäusen schneiden ließen. Der Eingriff führte dazu, dass auf dem Gen nach 11 bis 13 Wochen so genannte Indels nachweisbar waren – gewollte Mutationen in Form von Insertionen und Deletionen, also zusätzlich eingefügter beziehungsweise gelöschter Nukleotidsequenzen. Das so mutierte NRL-Gen bringt keinen funktionierenden Transkriptionsfaktor mehr hervor, was den gewünschten Effekt hatte: Die Stäbchen in der Retina begannen Zapfen zu ähneln. Um dieses Ergebnis zu erhärten, behandelten die Wissenschaftler genmanipulierte Mäuse, die nur Stäbchen besitzen, mit ihrem CRISPR/Cas9-System. Auch diese Tiere entwickelten daraufhin zapfenähnliche Zellen.

In mehreren Tests demonstrierten Yu und sein Team, dass Mäuse, die unter Retinopathia pigmentosa leiden, von dem genetischen Eingriff profitieren. Die CRISPR/Cas9-Behandlung beugte bei den Nagern nicht nur der Erkrankung vor, sie konnte die Netzhautdegeneration auch noch im fortgeschrittenen Stadium abmildern. Jene Schicht der Netzhaut, in der die Fotorezeptoren sitzen, sei bei den behandelten Tieren dicker gewesen als bei unbehandelten, schreiben die Wissenschaftler. Zudem war bei den ersten die Netzhautfunktion verbessert: Ihre Zapfen sprachen intensiver auf Lichtreize an. Die Therapie kann den Verlauf der Erkrankung also verzögern.

Wann CRISPR/Cas-Systeme allerdings hinreichend ausgereift sein werden, um sie auch in der Humanmedizin einsetzen zu können, weiß derzeit niemand. Noch funktio-

niert die Genschere recht rabiat, indem sie unter anderem an ungewollten Stellen schneidet (so genannte Off-Target Cuts). Die Forscher weisen noch auf ein weiteres Problem hin: Die bakterielle Endonuklease Cas9, die für den Eingriff in die Netzhautzellen eingebracht werden muss, könnte eine Immunantwort und andere unerwartete Effekte provozieren. Und schließlich ist fraglich, inwieweit sich Ergebnisse vom Mausmodell auf den Menschen übertragen lassen. Beider Netzhäute unterscheiden sich deutlich voneinander; so besitzen Mäuse als nachtaktive Säuger einen höheren Stäbchenanteil als Menschen.

Egal welcher Therapieansatz zuerst in der Humanmedizin verfügbar sein wird – er allein wird vermutlich nicht die Krankheit besiegen. Denn Verlauf, Vererbungsmuster und Schweregrad der Retinopathia pigmentosa unterscheiden sich zwischen den Betroffenen stark. So heterogen sich die Erkrankung zeigt, so variabel wird wohl auch die Therapie sein müssen. ◀

**Katharina Schmitz** ist Wissenschaftsjournalistin mit dem Schwerpunkt Biowissenschaften/Medizin.

## QUELLEN

**Montgomery, J. E. et al.:** A Novel Model of Retinal Ablation Demonstrates that the Extent of Rod Cell Death Regulates the Origin of the Regenerated Zebrafish Rod Photoreceptors. In: *Journal of Comparative Neurology* 6, S. 800–814, 2010

**Rao, M. B. et al.:** Neurotransmitter-Regulated Regeneration in the Zebrafish Retina. In: *Stem Cell Reports* 8, S. 831–842, 2017

**Yu, W. et al.:** Nrl Knockdown by AAV-delivered CRISPR/Cas9 Prevents Retinal Degeneration in Mice. In: *Nature Communications* 8, 14716, 2017



# SPRINGERS EINWÜRFE

## KI → ML

**In der Informatik hat sich gerade ein Paradigmenwechsel von der künstlichen Intelligenz (KI) zum maschinellen Lernen (ML) vollzogen. Er wird unser Leben grundlegend ändern.**

**Michael Springer** ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Soeben ist eine Sammlung seiner Einwürfe unter dem Titel »Unendliche Neugier. Was die Wissenschaft treibt« erschienen.

» [spektrum.de/artikel/1485623](http://spektrum.de/artikel/1485623)

**A**ls der US-amerikanische Physiker Douglas R. Hofstadter 1979 sein so originelles wie tief-sinniges Buch »Gödel, Escher, Bach« veröffentlichte, steckte die KI-Forschung in den Kinderschuhen – und kam anscheinend kaum aus ihnen heraus. Der Autor versuchte dennoch, aus dem damaligen (Still-)Stand kühne Folgerungen für die künftige Konvergenz von Bewusstseins- und Computerforschung zu ziehen. Das wesentliche Hemmnis für die KI sah Hofstadter in deren Unfähigkeit, so genannte seltsame Schleifen zu simulieren, das heißt selbstbezügliche Programmschritte zu vollziehen.

Im Wesentlichen beschränkte sich die damalige KI auf das Erstellen kognitiver Landkarten. Man stopfte beispielsweise möglichst viel medizinisches Wissen in Expertensysteme, die als automatische Diagnostiker fungierten: Wer bestimmte Symptome eingab, erhielt als Output die wahrscheinliche Krankheit. Oder man

## Das Neue heißt Deep Learning

brachte Robotern bei, Objekte in einem ungeordneten Haufen zu identifizieren und nach ihnen zu greifen. Doch stets blieben die Maschinen so intelligent wie ihre Programmierung, wie die Summe der von Menschen eingegebenen Daten und Befehle. Nie entdeckte das Expertensystem eine neue Krankheit, nie interessierte sich der Roboter für einen Gegenstand, den das Greifprogramm nicht vorsah.

Freilich ließen sich die KI-Programme quasi belehren, indem Menschen sie mit immer mehr Befehlen und Daten fütterten. Doch letztlich verfolgte diese Materialschlacht das unerreichbare Ziel, den Maschinen von Anbeginn alle Aspekte der Wirklichkeit einzublauen, sie mit einer kognitiven Landkarte im Maßstab eins zu eins auszustatten. Der Computer, der erstmals einen Schachmeister besiegte, hatte einfach mehr Züge parat, als in einen menschlichen Kopf passen.

Paradigmenwechsel schleichen auf Samtpfoten, für Zeitgenossen fast unmerklich. Unter der Hand fand ein Übergang von der »alten« KI zu etwas Neuem statt, dessen Keime sich längst angekündigt haben – etwa in Hofstadters Buch –, das aber jetzt voll da ist (*Sonderausgabe »The Cyberscientist«, Science 357, S. 16–27, 2017*).

**D**as Neue heißt Deep Learning oder maschinelles Lernen (ML). Programmstrukturen simulieren die mehrschichtige Vernetzung von Hirnneuronen und erwerben so selbsttätige Lernfähigkeit. Dieses kognitive Eigenleben verdient eigentlich erst jetzt den Ehrentitel (künstliche) Intelligenz. Der letzte Schrei sind »Generative Adversarial Networks« (etwa Erzeuger-Gegner-Netze), die paarweise kreativ konkurrieren: Das eine Netz schlägt neue Problemlösungen vor, die sich gegen die Kritik des Partners bewähren müssen.

Schon die dadurch eröffnete Aussicht auf einen partiell automatisierten Forschungsprozess ist atemberaubend – von den gesellschaftlichen Folgen einer Allgegenwart autonomer Automaten ganz zu schweigen. ML-Programme beginnen, die aus Teilchenbeschleunigern und Teleskopsystemen strömenden Datenfluten auszuwerten; sie werden neue Biomoleküle synthetisieren, Mikroben für die Herstellung bestimmter Substanzen züchten, Krankheitsgenkomplexe aufspüren und aus den sozialen Netzen kulturelle, medizinische oder politische Erkenntnisse gewinnen.

Die zu erwartenden Erkenntnisprünge haben ihren Preis. Ein tiefes neuronales Netz funktioniert als für uns undurchschaubare Blackbox, deren Innenleben eine eigene Neurowissenschaft zweiter Ordnung erfordern wird. Der Sciencefiction-Autor Ted Chiang hat schon 2000 ein weiteres Dilemma ausgemalt (siehe »Offizielle Erklärung zum Stand der menschlichen Forschung«, *Spektrum* März 2017, S. 96): Die von lernenden Maschinen betriebene Naturforschung könnte mit der Zeit für uns Menschen unbegreifliche Ergebnisse liefern.



Der eineinhalb Meter lange Dromaeosaurier *Zhenyuanlong suni*, ein Verwandter von *Velociraptor*, konnte mit seinen kleinen Flügeln an den kurzen Armen nicht fliegen.

# PALÄONTOLOGIE DAS PUZZLE DER VOGELEVOLUTION

Die Vögel entstanden nicht in wenigen großen Evolutions-  
schritten. Viele charakteristische Eigenschaften waren schon  
lange vor ihnen bei Dinosauriern vorhanden.

» [spektrum.de/artikel/1485123](https://www.spektrum.de/artikel/1485123)





**Stephen Brusatte** ist Paläontologe an der University of Edinburgh.

Sehr früh an einem kalten Novembermorgen 2014 fuhr ich mit dem Zug von Peking in die Dreimillionenstadt Jinzhou im Nordosten Chinas. Gern hätte ich noch etwas geschlafen, aber dazu war ich zu aufgeregt. Mein Kollege Junchang Lü, ein namhafter Paläontologe von der Chinesischen Akademie für Geologische Wissenschaften in Peking, hatte mich gebeten, ihn auf dieser Fahrt zu begleiten. Angeblich wartete auf uns ein ganz besonderes Fossil, auf das ein Bauer beim Ernten gestoßen war. Das wollten wir zusammen begutachten und untersuchen.

Am Bahnhof von Jinzhou nahmen uns mehrere ranghohe Persönlichkeiten in Empfang, die uns gleich ins Stadtmuseum eskortierten, ein baufälliges Gebäude in einem Außenbezirk. Ernst und feierlich, als handle es sich um ein politisches Gipfeltreffen, schritt unser Trupp durch einen langen Flur und betrat dann einen Nebenraum, wo ein Felsbrocken auf einem kleinen Tisch thronte.

Und da fand ich mich einem der schönsten Fossilien gegenüber, das ich je gesehen hatte: ein Skelett von der Größe eines Esels, die Knochen dunkel schokoladenbraun, die sich gut gegen ihr Bett aus hellgrauem Kalkstein abhoben (siehe Bild rechts). Dass es sich um einen Dinosaurier handelte, erkannten wir auf den ersten Blick, auch dass dies ein naher Verwandter von *Velociraptor* war, dem zweibeinigen Raubtier, das viele aus dem Film »Jurassic Park« kennen. Dafür sprachen eindeutig die steakmesserartigen Zähne, die spitzen Klauen und der lange Schwanz.

Aber bei genauerer Begutachtung unterschied sich dieses Tier von gewöhnlichen Dinosauriern in einigen wesentlichen Kennzeichen. Es hatte leichte, hohle Knochen und lange, dünne Beine wie ein Reiher. Und es trug ein Kleid aus verschiedenen Federarten. An den Armen wies es

sogar kleine Flügel aus übereinander angeordneten großen gekielten Federn auf. Kurz, das Tier erinnert in vielem an einen Vogel. Lü und ich beschrieben den Fund 2015 als Fossil einer neuen Art, die wir *Zhenyuanlong suni* nannten; »long« heißt Drache, und einem Herrn Zhenyuan Sun ist es zu verdanken, dass das Objekt ins Museum kam. Das Tier ist einer der neuesten Funde unter den zahlreichen gefiederten Dinosauriern, die in den letzten 20 Jahren in der Provinz Liaoning aufgetaucht sind. Sortiert man all diese Fossilien, dann lassen sie recht gut erahnen, wie die Evolution von den großen Urzeitechsen zu den Vögeln ablief.

Die reichen Fossilfunde beleuchten jedoch nicht nur die Vogelevolution. Sie erweitern auch unser Verständnis davon, wie sich völlig neue Tiergruppen herausgebildet haben. Seit Charles Darwin (1809–1882) fragen sich Evolutionsforscher, ob neuartige Lebensformen eher schlagartig entstehen oder in vielen kleinen Schritten im Lauf einer langwierigen Entwicklung. Machte also plötzlich irgend eine verrückte Mutation, quasi eine Laune der Natur, aus einer am Boden lebenden Kreatur ein Geschöpf der Lüfte? Oder geschah der Übergang gemächlich, so wie auch Anpassungen an eine veränderte Umwelt manchmal Jahrmillionen benötigen?

#### Wie von Frankenstein geschaffen:

##### Der Urvogel *Archaeopteryx* aus Solnhofen

Die Vögel heben sich in ihren Merkmalen in vieler Hinsicht von allen übrigen heutigen Tieren ab. Außer ihrem einmaligen Rüstzeug zum Fliegen verfügen sie über einen besonders intensiven Stoffwechsel, dank dem die Jungen geradezu rasant wachsen, und sie besitzen ein großes Gehirn, das ihnen hohe Intelligenz und exzellente Sinne verleiht. Die Vögel wirken so einzigartig, dass sich Forscher über ihre Herkunft lange den Kopf zerbrachen.

Zu diesem Kreis zählte Darwins Freund und lautstärkster Mitstreiter Thomas Henry Huxley (1825–1895). Darwins Hauptwerk zur Entstehung der Arten war 1859 erschienen. Und 1861 wurde bei Solnhofen in Bayern das erste fossile Skelett des »Urvogels« *Archaeopteryx* entdeckt, einer wie von Frankenstein geschaffenen Kreatur, die vor rund 150 Millionen Jahren lebte: Sie besaß scharfe Krallen und einen langen Schwanz wie ein Reptil, aber Federn und Flügel wie ein Vogel. Huxley bemerkte eine frappierende Ähnlichkeit mit kleinen zweibeinigen, Fleisch fressenden Dinosauriern, deren erste Fossilien in jenen Jahren ebenfalls ans Tageslicht kamen, darunter der truthahngröße *Compsognathus*. Stammten die Vögel etwa von Dinosauriern ab? Viele widersetzten sich diesem damals exotischen Vorschlag Huxleys, und noch in den nächsten 100 Jahren sahen sich mal die Befürworter, mal die Gegner der Idee im Recht.

Wie oft in solchen Fällen brachten erst weitere Fossilien Klarheit. In den 1960er Jahren fand der amerikanische Paläontologe John Ostrom (1928–2005) im westlichen Nordamerika Fossilien des erstaunlich vogelähnlichen Dinosauriers *Deinonychus*. Dieser Zweibeiner wurde mehrere Meter lang. Sein leicht gebautes Skelett ließ an ein aktives, agiles Tier denken, und die langen Arme gemahnten fast an Flügel. Ostrom überlegte sogar, ob es bereits Federn trug. Denn die Vorstellung, dass die Vögel

## AUF EINEN BLICK LEBENDE DINOSAURIER

- 1 Streng genommen zählen die Vögel zu den Dinosauriern. Reiche Fossilfunde unter anderem in China dokumentieren viele Details ihrer Evolution.
- 2 Die typischen Merkmale der Vögel kamen erst langsam zusammen. Vielfach dienten sie zunächst völlig anderen Zwecken als heute.
- 3 Große evolutionäre Übergänge ereignen sich kaum schlagartig. In der Regel scheinen sie lange zu dauern.



Das Fossil des gefiederten Theropoden *Zhenyuanlong suni* stammt aus Jinzhou im nordöstlichen China. Zusammen mit vielen anderen Funden aus der letzten Zeit erhellt dieser Dinosaurier die Abstammung der Vögel. Die dunkleren Schattierungen an den Armen und am abgebrochenen Schwanz stammen vom Federkleid. Deutlich zu sehen sind rechts die beiden Flügel.

von Dinosauriern abstammen, begann sich vor 50 Jahren langsam durchzusetzen. Die große Frage war allerdings, zu welcher Zeit Federn entstanden waren. Von *Deinonychus* hatten sich nur Knochen fossil erhalten, leider aber keine Überreste der viel empfindlicheren Federn.

Nun hieß es hoffen, dass eines Tages vielleicht doch ein Dinosaurierfossil mit derart feinen Strukturen auftauchen würde. Und tatsächlich: Auf einer Fachtagung 1996 in New York sprach der kanadische Paläontologe Philip Currie, der heute an der University of Alberta in Edmonton arbeitet, Ostrom an. Er war gerade aus China zurückgekehrt und hatte dort von einem außergewöhnlichen Fossil erfahren. Von dem zeigte er nun Ostrom ein Foto. Da war er: ein kleiner Dinosaurier mit deutlichem Federsaum. Vulkanasche hatte das Tier begraben und Abdrücke der Feinheiten bewahrt. Angesichts des ersten solchen Fossils mit erkennbaren Federn kamen dem berühmten Forscher die Tränen.

Der später *Sinosauropteryx* genannte Dinosaurier versetzte die Experten in eine Art Goldrausch. Wer konnte, machte sich auf in die Liaoning-Region, von wo der spektakuläre Fund stammt. Die Entdeckungen überschlugen sich. Mehr als 20 verschiedene gefiederte Dinosaurierarten, oft in diversen Exemplaren, haben Paläontologen seither in der Gegend aufgestöbert – an sich sind es meistens die Bauern, die wissen, wo auf ihrem Land die Suche lohnt. Das Spektrum umfasst neun Meter lange, mit Flaum bedeckte Verwandte der Ahnen von *Tyrannosaurus rex*, hunde-große Pflanzenfresser mit einfachen, langen, dicken Stachelhaaren sowie krähengroße Gleiter mit richtigen Flügeln. Diese Fossilien zählen zu den berühmtesten der Welt.

Bedeutsam sind sie auch deswegen, weil sie zeigen: Die Vögel stammen wirklich von Dinosauriern ab. Doch diese Formulierung ist eigentlich nicht ganz korrekt. Ge-

nau genommen sind Vögel nämlich ebenfalls Dinosaurier – nicht weniger als beispielsweise ein *Triceratops* oder *Brontosaurus*. Systematiker ordnen sie einer der vielen Untergruppen zu, die vom letzten gemeinsamen Vorfahren aller Dinosaurier abstammen (siehe »Gradueller Wandel«, S. 34/35). In gleicher Weise zählen etwa Fledermäuse zu den Säugetieren, obwohl sie fliegen können.

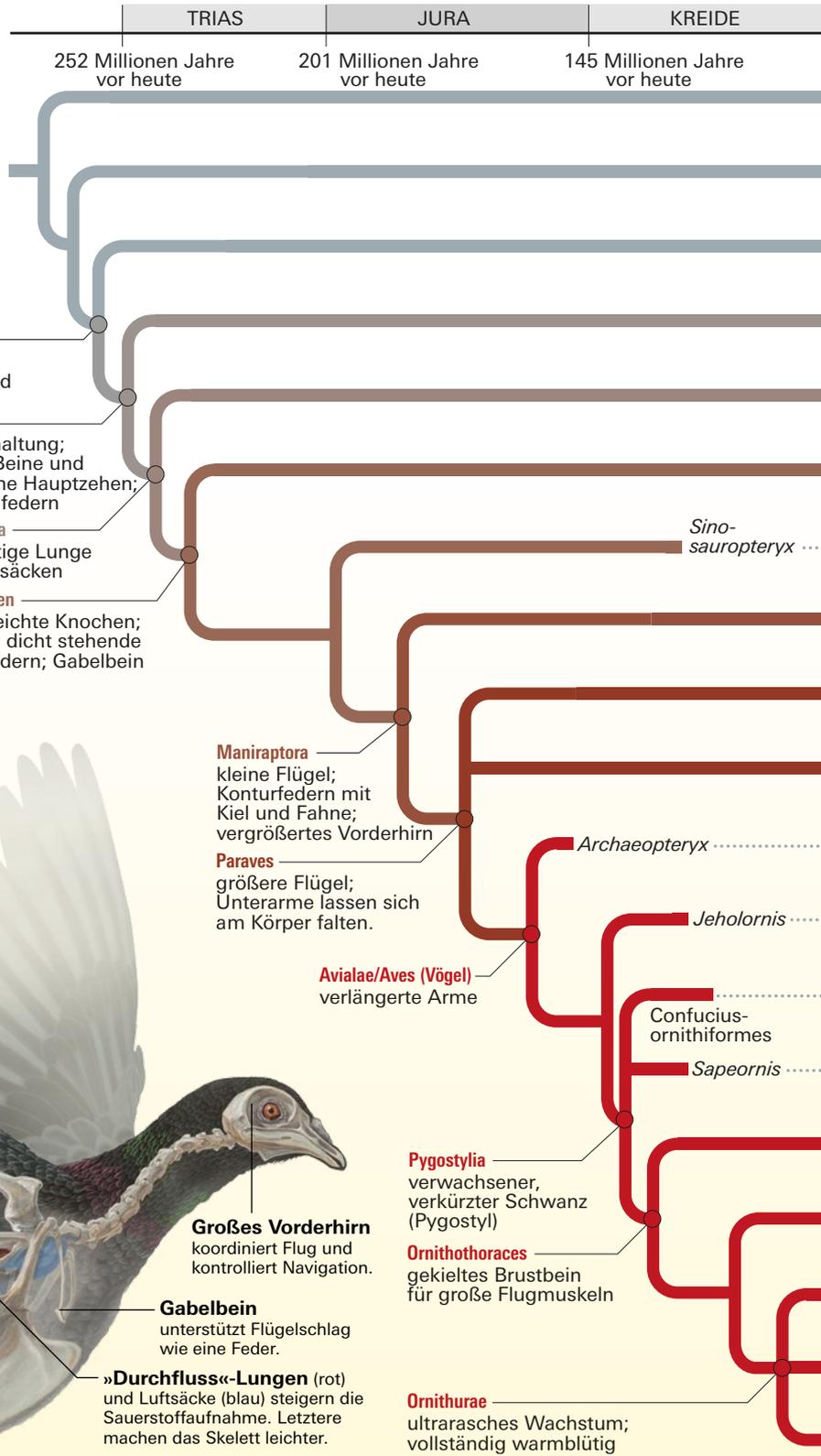
#### Warum die Vögel zu den Dinosauriern gehören ... und zwar zur Verwandtschaft der agilen Raptoren

Die Liaoning-Fossilien halfen außerdem zu enträtseln, wo im Dinosaurierstammbaum die Vögel sitzen: Sie gehören genauso wie die monströsen Fleischfresser *T. rex*, *Allosaurus* und *Spinosaurus* zu den Theropoden. Ihre nächsten Verwandten innerhalb dieser Gruppe sind allerdings die viel kleineren, agileren und mit relativ größerem Gehirn ausgestatteten »Raptoren« (Maniraptora), darunter sowohl *Velociraptor* wie *Deinonychus*, den Ostrom entdeckt hatte, als auch der so atemberaubend vogelähnliche *Zhenyuanlong*, den Lü und ich beschrieben. Irgendwo inmitten dieser gefiederten Arten muss die Grenze zu den Vögeln liegen.

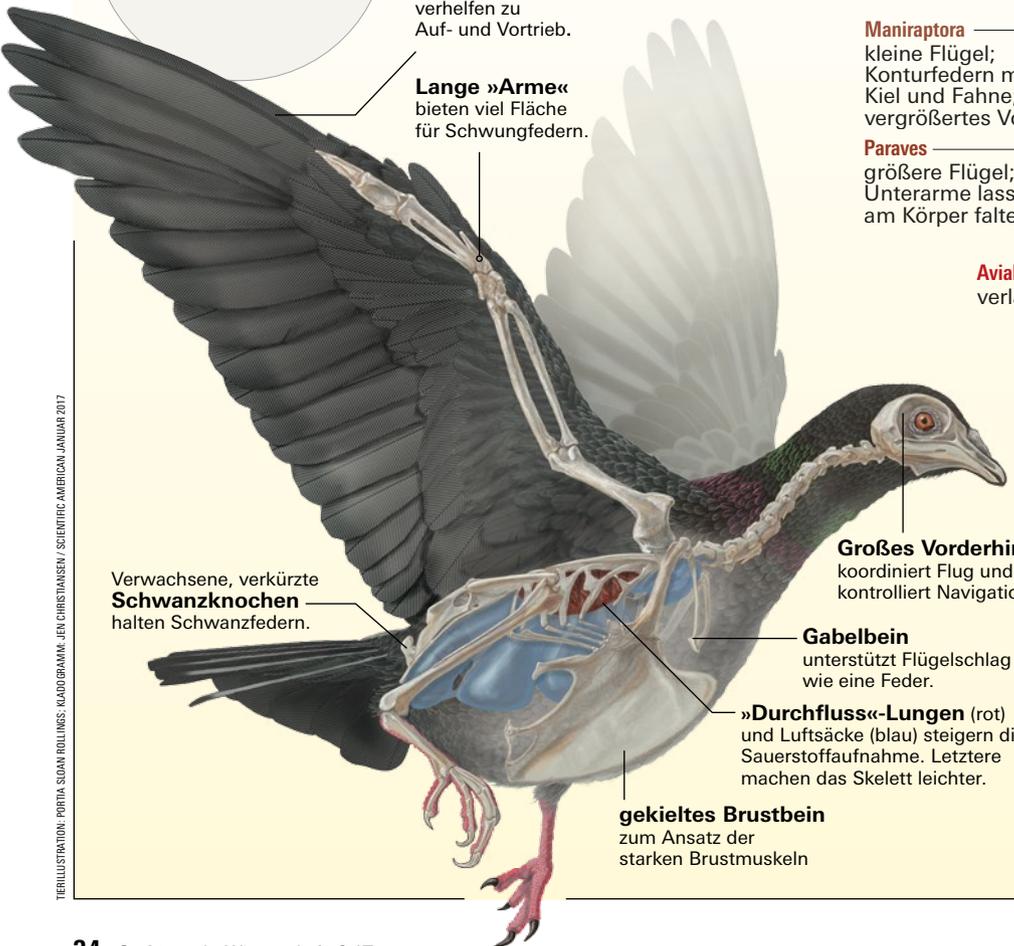
Inzwischen erlauben die vielen Fossilien aus Liaoning und anderen Regionen uns Forschern einen recht guten Einblick in jenen großen evolutionären Übergang. Bei diesen Studien kommt heutzutage eine Fülle neuester Technologien zum Einsatz: computertomografische Aufnahmen, um anatomische Feinheiten aufzudecken; rechnergestützte Analysen zur Rekonstruktion von Stammbäumen; Computermodelle für Bewegungsweisen; sowie ausgefeilte Statistik, um die Evolution neuer Arten und Baupläne nachzuvollziehen. Mit Hilfe all dieser modernsten Methoden können meine Kollegen und ich Stück für Stück rekonstruieren, was damals geschah. Und nicht

# Gradueller Wandel

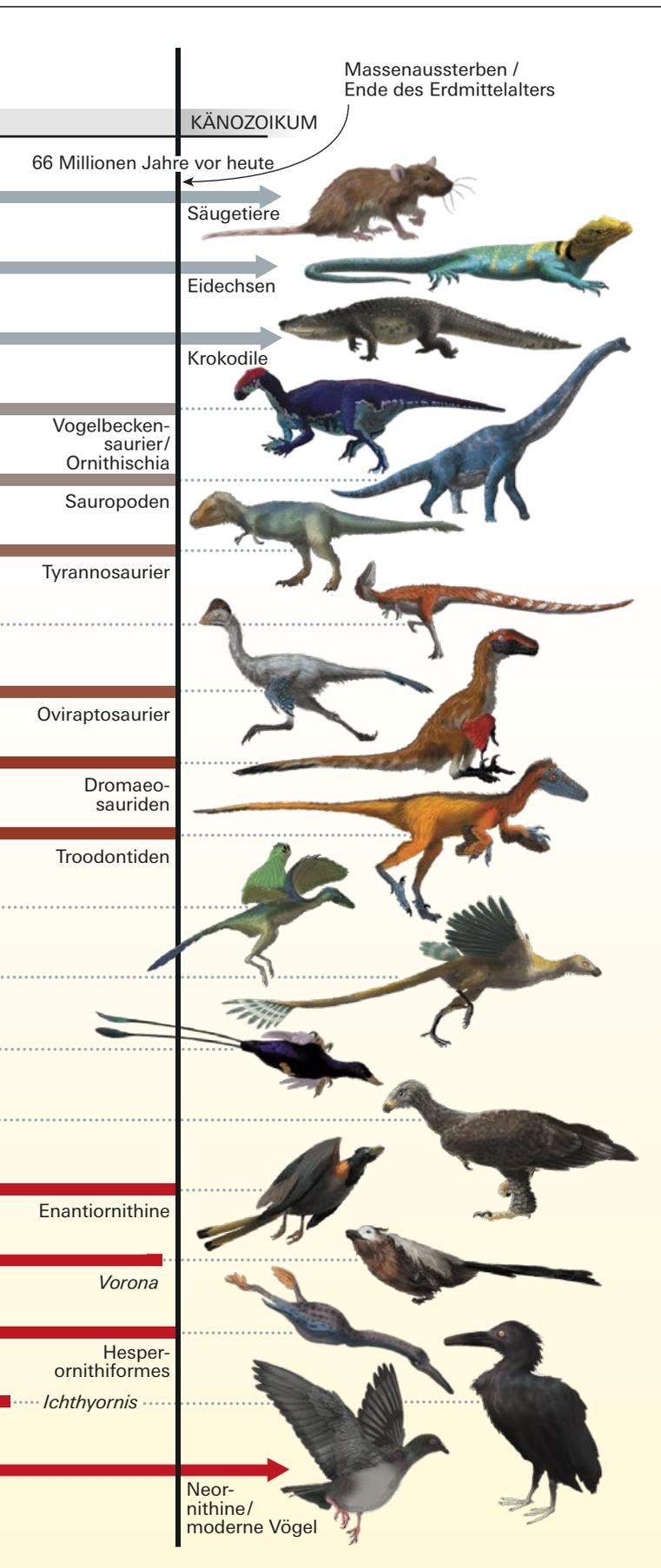
Nicht ein Sprint, sondern ein Langstreckenlauf führte zu den Vögeln. Anscheinend ist es in der Evolution normal, dass sich völlig neue Erscheinungsformen ganz allmählich herausbilden. Im Fall der Vögel waren entscheidende Merkmale wesentlich früher und oft zu anderen Zwecken entstanden. Es dauerte viele Jahrmillionen, bis sie miteinander die neue Lebensweise prägten.



**Unverkennbar ein Vogel**  
Viele Vogelmerkmale dienen dem Fliegen.



TIERILLUSTRATION: PORTIA SUDAN ROLLINS; KLAUD/GRAMM; JEN CHRISTENSEN / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2017



zuletzt geben die Ergebnisse Aufschluss darüber, in welcher Weise im Tierreich neue Großgruppen entstehen.

Wer die Evolution der Vögel aufklären will, muss sich auch mit dem Ursprung von Federn befassen. Schließlich sind sie das unverwechselbare Ausweisschild dieser Gruppe. Aber was für eine Visitenkarte! Federn sind multifunktional, sozusagen ein Schweizer Taschenmesser der Natur. Außer zum Fliegen dienen sie zum Protzen vor Geschlechtspartnern oder Rivalen, zum Warmhalten sowie Eierausbrüten auf dem Nest und zu manchem mehr. Welche ihrer vielfältigen Funktionen zuerst aufkam, ließ sich zunächst schwer beantworten.

Zumindest zeigen die Liaoning-Fossilien ganz klar: Federn traten nicht etwa plötzlich mit den ersten Vögeln auf, sondern bereits viel früher bei deren fernen Dinosauriovorfahren. Vielleicht war sogar schon der letzte gemeinsame Ahne aller Dinosaurier gefiedert. Die frühen Federn glichen dabei noch keineswegs einer typischen modernen, langen, flachen so genannten Konturfeder mit Kiel und Fahne. Die Körperbedeckung von *Sinosauropteryx* und vielen anderen Arten wirkte eher wie ein Haarflaum aus unzähligen Fädchen. Fliegen konnten diese Tiere nicht. Sie besaßen keine Flügel; außerdem hätten solche Gebilde einem Luftstrom gar nicht widerstanden. Ihr Zweck musste ein anderer gewesen sein. Vermutlich hielten sie jene kleinen Dinosaurier warm.

### Fluffige Dinosaurier, die nicht fliegen konnten, aber mit ihrem bunten Federkleid protzten

Den meisten Arten genügte ein Mantel aus borstigen Federn. Die Maniraptora jedoch – eine Gruppe der Theropoden – entwickelten daraus etwas Neues. Die Borsten wurden länger, und irgendwann fingen sie an sich zu verzweigen, zunächst nur in ein paar einfache Büschel. Schließlich entstanden komplexer strukturierte, flache Anhängsel mit einem zentralen Kiel und zwei seitlich abzweigenden Fahnen, deren feine Verästelungen ineinanderhaken und die dadurch dem Luftstrom widerstehen. An den Armen aufgereiht, eigneten sich solche Konturfedern für Flügel. Einige der Liaoning-Dinosaurier, etwa der rabengroße *Microraptor*, den Xing Xu vom Institut für Wirbeltierpaläontologie der Chinesischen Akademie der Wissenschaften beschrieb, trugen sogar Flügel an Beinen und Schwanz.

Wer nun allerdings meint, die Umgestaltung der Federn und die Entstehung von Flügeln geschahen wegen des Fliegens, irrt. Zwar vermochten manche der kleineren Arten wie *Microraptor* mit ihren Flügeln wahrscheinlich zu gleiten. Das zeigen Windkanalexperimente und Computersimulationen unter Leitung des britischen Paläontologen Gareth Dyke von der Universität Debrecen (Ungarn). Doch andere Arten, auch *Zhenyuanlong*, die einen schweren Körper und nur kurze Arme hatten, waren sicherlich ans Bodenleben gebunden. Überdies besaß keiner dieser geflügelten Dinosaurier die zum kraftvollen Flügelschlag erforderlichen massigen Brustmuskeln. Und nur wenige verfügten über asymmetrische Konturfedern, bei denen die Außenfahne oder Leitfahne schmaler und steifer ist als die Innenfahne, wodurch sie sich erst zu aktiven Flugmanövern eignen.

TEBERILLUSTRATIONEN: PORTIA SUOAN ROLLINGS; KLADODRAMA: JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2017

Nach neuesten Erkenntnissen könnten Flügel zunächst vielmehr dazu gedient haben, sich zur Schau zu stellen. So zeigte Jakob Vinther von der University of Bristol mit leistungsstarker Mikroskopiertechnik, dass die Federn geflügelter, nicht flugfähiger Dinosaurier voller Pigmente steckten, die ihnen diverse Farben verliehen und Muster bildeten. Manche Federn schillerten sogar wie das irisierende Gefieder etwa von Krähen. Solche äußere Pracht kann sich hervorragend dazu eignen, Rivalen einzuschüchtern oder Geschlechtspartner anzulocken.

Wenn die neue These zutrifft, wären die Flügel der Dinosaurier somit zur Signalgebung entstanden. Arme, Beine und Schwanz bildeten quasi große Werbeflächen, die nebenbei auf Grund der physikalischen Gesetze auch aerodynamisch funktionierten. Fliegen wäre dann rein durch Zufall erfunden worden und vielleicht mehr als einmal, als die verschiedenen Maniraptoren beim Herumhüpfen große Sätze vollführten, Bäume hinaufhuschten oder von Ast zu Ast sprangen. Erst mit der Zeit verloren Angehörige in einem Zweig der Gruppe an Größe, entwickelten überlange Arme sowie starke Brustmuskeln und büßten den langen Schwanz ein – wurden also zu Vögeln.

### **Die typischen Merkmale der Vögel entstanden schon Jahrmillionen vor deren Auftritt**

Die Evolution von Federn und Flügeln ist aber nur ein besonders augenfälliges Beispiel aus einer Anzahl anderer Entwicklungen, die zusammen ein viel größeres Muster abgeben. An den Dinosauriern von Liaoning lässt sich nämlich außerdem zeigen, wie zahlreiche andere vermeintlich exklusive Merkmale der Vögel bereits Millionen von Jahren vor deren Auftreten entstanden – doch nicht im Zusammenhang mit dem Fliegen.

So kamen die langen, geraden Beine der Vögel und ihre drei dünnen Hauptzehen erstmals vor mehr als 230 Millionen Jahren bei ganz frühen Dinosauriern auf. Dies ging offenbar mit der Umgestaltung des Reptilienkörpers in aufrecht gehende Kreaturen einher, die dann im Sprint etwaige Konkurrenz auszustechen vermochten, ob bei der Paarung oder bei der Jagd auf Beute. Betont kräftige Hinterbeine kennzeichneten alle Dinosaurier und zählten zu den Attributen, welchen sie ihre Herrschaft verdankten. Bei den ersten Theropoden verschmolzen dann das rechte und das linke Schlüsselbein in der Körpermitte zum Gabelbein. Diese scheinbar geringfügige Neuerung stabilisierte den Schultergürtel. Damit vermochten die hundegroßen Räuber die Schockkräfte beim Packen der Beute besser aufzufangen. Bei den Vögeln dann spannt sich das Gabelbein wie eine Feder, die beim Flügelschlag Energie speichert.

Ebenso reichen die evolutionären Wurzeln der charakteristischen luftgefüllten Hohlknochen der Vögel mit Verbindung zu den großen Luftsäcken und der Lunge weit zurück, für die Flugfähigkeit wichtige Merkmale. Denn schon viele Dinosaurier hatten von Luftsäcken ausgehöhlte Knochen – ein Zeichen für die für Vögel typischen hocheffizienten »Durchfluss«-Lungen, die Sauerstoff auch im Ausatmen aufnehmen. Ihre leichten Knochen sparen den Vögeln viel Gewicht ein, während das Luftsacksystem den enormen Energieumsatz ermöglicht.

Das rasante Wachstum junger Vögel bahnte sich gleichfalls früh an. Die Feinstruktur der Knochen von Dinosauriern lässt erahnen, dass deren Stoffwechsel- und Wachstumsraten etwa in der Mitte zwischen den kaltblütigen, langsam heranreifenden Reptilien und den warmblütigen, rasch ausgewachsenen heutigen Vögeln lag. Mehr als 100 Millionen Jahre bevor sich Vögel in die Luft erhoben, begannen die ersten geschwind rennenden, langbeinigen Dinosaurier schneller heranzuwachsen als die trägen Amphibien, Eidechsen und Krokodile, gegen die sie sich behaupten mussten. Als Anpassung an ihren hohen Energiebedarf entwickelten sie Durchfluss-Lungen.

## **Die Dinosaurier hatten einen rascheren Stoffwechsel und wuchsen schneller als kaltblütige Reptilien**

Selbst die im Vergleich zu den großen Dinosauriern verschwindend geringen Körpermaße begannen sich nicht erst mit den Vögeln zu entwickeln. Das erkannten Mike Lee von der Flinders University in Adelaide (Australien) und Roger Benson von der University of Oxford unabhängig voneinander. Demnach fing eine allmähliche Größenabnahme bereits bei den Maniraptora an und setzte sich mehr als 50 Millionen Jahre lang fort. Was diesen Trend befeuerte, ist unklar. Möglicherweise konnten jene kleineren gefiederten Dinosaurier neue ökologische Nischen einnehmen. Vielleicht lebten sie in Bäumen oder im Unterholz oder bewohnten sogar Höhlen oder Erdlöcher, wo Giganten wie *Brachiosaurus* und *Stegosaurus* nicht hinkamen.

So manche Verhaltens- und Gehirnerkmale der Vögel gehen ebenfalls auf die Dinosaurier zurück. Viele dieser Befunde stammen aus der Wüste Gobi. Ein Team des American Museum of Natural History in New York und der Mongolischen Akademie der Wissenschaften entdeckte dort in den letzten rund 25 Jahren unter der Leitung von Mark Norell und Michael Novacek eine Vielzahl an Fossilien aus der späten Kreidezeit mit einem Alter zwischen 84 und 66 Millionen Jahren (siehe ihr Artikel in **Spektrum** Februar 1995, S. 68). Diese Versteinerungen geben einzigartig genaue Einblicke in die Lebensweise der Dinosaurier und frühen Vögel. Hierzu zählen gut erhaltene Schädel von *Velociraptor* und anderen gefiederten Maniraptoren. Amy Balanoff von der Stony Brook University (US-Bundesstaat New York) hat einige davon im Computertomografen durchleuchtet. Die Tiere besaßen demnach ein recht großes Gehirn, und besonders sein vorderster Bereich hatte zugenommen. Nun sitzt die Intelligenz der Vögel gewissermaßen in ihrem großen Vorderhirn. Ohne diese neuronale Rechenmaschine könnten sie zudem keine komplizierten Flugmanöver durchführen und würden sich im dreidimensionalen Luftraum nicht zurechtfinden. Weswegen bereits die Maniraptoren eine gesteigerte Intelligenz entwickelten, wissen wir allerdings noch nicht.

All dies zusammen betrachtet, entstand der Bauplan der Vögel also nicht in einem einzigen großen Wurf, son-

dern aus einer Menge Einzelentwicklungen. Zur Veranschaulichung spreche ich gern von einem Satz Lego-Bausteinen, die nach und nach Stück für Stück zu etwas ganz Neuem zusammengesetzt werden.

Wegen jener langwierigen Evolution in vielen kleinen Schritten lässt sich keine klare Trennlinie zwischen den »Vögeln« und ihren unmittelbaren »Nichtvogel«-Vorfahren erkennen. Das habe ich zusammen mit Kollegen 2014 in einer Untersuchung belegt, die aus meiner von Norell betreuten Doktorarbeit hervorging. Wir begutachteten darin Fossilien aus der fraglichen Übergangsphase. Mein Doktorvater, der Paläobiologe Graeme Lloyd von der University of Leeds (England), der Paläostatistiker Steve Wang vom Swarthmore College (Pennsylvania) und ich trugen von rund 150 Theropoden aus jener Zeitspanne Datensätze für mehr als 850 Skelettmerkmale zusammen. Mit einem Statistikverfahren, das viele Merkmale einrechnet, bildeten wir jede Art in einem so genannten Morphospace (einem »Gestalttraum«) ab. Im Prinzip handelt es sich dabei um eine mehrdimensionale Karte, auf der die Arten entlang mehrerer Achsen nach dem Anteil von Merkmalen gruppiert sind, die sie miteinander teilen. Zwei sehr ähnliche Arten liegen dann nah zusammen, während in vielem verschiedene Arten weit auseinanderrücken.

### Statistisch ermittelte Grafiken veranschaulichen den schwammigen Übergang in der Vogelevolution

Wären die Vögel aus Dinosauriern auf Grund einer Anzahl rasch aufeinander folgender einschneidender Mutationen hervorgegangen, hätte sich demnach binnen kurzer Zeit eine völlig andere Tierform herausgebildet, dann müssten die beiden Gruppen von Theropoden auf der Karte deutlich verschiedene Bereiche, also eigene Morphospaces einnehmen. Das ist aber nicht der Fall. Vielmehr finden sich die damaligen Vögel bunt verstreut mitten in der Wolke der Dinosaurier. Das heißt, ihre Entwicklung geschah so langsam, dass der Übergang verschwamm.

Daraus folgt: Die Vögel sind einfach ein besonderer Typ von Dinosauriern. Hätte ich vor 125 Millionen Jahren in Jinzhou sein können und wäre dort einem lebenden *Zhenyuanlong* begegnet, der beim vergeblichen Versuch, dem tödlichen Ascheregen zu entkommen, mit seinen kleinen Flügeln flatterte, dann hätte ich ihn wohl für einen großen Vogel gehalten. Doch sicherlich hätte ich die damaligen Dinosaurier und Vögel ein- und derselben Tiergruppe zugeordnet. Dass dieser *Zhenyuanlong* heute als Dinosaurier gilt und nicht als Vogel, beruht auf einer seit Langem herrschenden Übereinkunft: Zu den Vögeln zählen Paläontologen traditionell alle Arten, die vom letzten gemeinsamen Vorfahren von *Archaeopteryx* und den modernen Vögeln abstammen – in der Hauptsache also kleine, flugfähige Gefiedertiere mit voll entwickelten Flügeln. Die Dromaeosauriden, und mit ihnen *Zhenyuanlong*, gehören aber nicht dazu, denn ihre Evolutionslinie hat sich kurz vorher abgezweigt (siehe »Gradueller Wandel«, S. 34/35).

Aber selbst wenn die Vögel eigentlich Dinosaurier sind und keine eigene Tierklasse bilden, sollten wir sie nicht gering schätzen. Sie stellen trotzdem etwas Besonderes

dar, haben sie doch zu einer völlig neuen Daseinsweise gefunden und eine ungeheure Vielfalt hervorgebracht. Wenigstens 10 000 Arten dürften heute existieren, mit so verschiedenen Formen wie den Kolibris und den Straußenvögeln. Und in noch einer Hinsicht ragen sie heraus: Sie sind die einzigen Dinosaurier, welche die Umweltkatastrophe vor 66 Millionen Jahren überlebt haben.

Wie viele Zufälle haben im Verlauf von Jahrtausenden zur Entstehung der Vögel beigetragen! Die Evolution vermag nicht vorzuschauen. Niemand von uns, wäre er damals dabei gewesen, hätte geahnt, was aus dem Federkleid der Dinosaurier, das zum Warmhalten und Prahlens diente, einmal werden würde. Die Evolution wirkt stets nur aus dem Augenblick heraus, mit dem gerade Vorhandenen, das vom nie verschwindenden, immerfort wechselnden Umwelt- und Wettbewerbsdruck geprägt ist. Je mehr die Wissenschaftler andere bedeutende Übergänge in der Evolutionsgeschichte der Tierwelt begreifen – ob den Landgang der Wirbeltiere, die Umwandlung von Landsäugetieren in Wale oder die Entstehung unseres aufrechten Gangs –, umso mehr kristallisiert sich heraus, dass sie nach demselben Prinzip abzulaufen scheinen: So ein Wandel gleicht nicht einem Sprint, sondern eher einem Marathonlauf, wenn auch ohne Ziellinie.

Noch ein Befund unserer Statistikstudie ist erwähnenswert, den wir so nicht erwartet hatten. Er könnte erklären, wieso ausgerechnet die Vögel das Massenaussterben am Ende der Kreidezeit überlebten. Anhand unserer großen Datensätze haben wir Evolutionsraten von Skelettmerkmalen ermittelt, also das Tempo von deren Veränderungen – als Anzeichen für evolutionäre Vitalität. Dabei zeigte sich: Die ganz frühen Vögel legten ein außergewöhnliches Tempo vor, viel rascher als *Velociraptor*, *Zhenyuanlong* und andere nah verwandte Zeitgenossen aus der »Nichtvogel«-Fraktion. Sobald das Lego-Kit beisammen war, entfaltete es anscheinend ein riesiges evolutionäres Potenzial. Damit bewältigten die Vögel sogar die Verheerungen nach dem Asteroideneinschlag. In jener total veränderten Welt fanden sie dadurch genügend neue Lebensmöglichkeiten. ◀

### QUELLEN

**Brusatte, S.L. et al.:** Gradual Assembly of Avian Body Plan Culminated in Rapid Rates of Evolution across the Dinosaur-Bird Transition. In: *Current Biology* 24, S. 2386–2392, 2014

**Lü, J., Brusatte, S.L.:** A Large, Short-Armed, Winged Dromaeosaurid (Dinosauria: Theropoda) from the Early Cretaceous of China and its Implications for Feather Evolution. In: *Scientific Reports* 5, 11775, 2015

### LITERATURTIPPS

**Dyke, G.:** Zeitgenossen der Dinosaurier. In: *Spektrum der Wissenschaft* 1/2011, S. 30–35  
*Vogelfossilien aus der Kreide stürzen alte Ansichten.*

**Foth, C. et al.:** Als die Federn fliegen lernten. In: *Spektrum der Wissenschaft* 4/2015, S. 28–33  
*Studie über einen neuen Archaeopteryx und die Evolution der Vögel*

Beide Artikel auch in: *Brennpunkte der Evolution. Spektrum der Wissenschaft Spezial: Biologie Medizin Hirnforschung* 4.16

# EVOLUTION

# FASZINIERENDE

# RIESENVIEN

**SERIE: VIEN** Noch vor 15 Jahren waren sie unbekannt, jetzt stehen sie im Zentrum des Interesses: Riesenviren. Manches an ihnen erinnert an komplexe Zellen, so etwa das gut ausgestattete Genom. Und vielleicht reicht ihr Ursprung bis in die Frühzeit des Lebens vor 3,7 Milliarden Jahren zurück.



Chantal Abergel und Jean-Michel Claverie sind Forscher an der Aix-Marseille Universität und beim CNRS (Centre national de la recherche scientifique). Claverie leitet das Laboratoire Information Génomique et Structurale (IGS) und praktiziert an einer Klinik. Abergel ist stellvertretende Leiterin des IGS.

Mitarbeit: Jean-Jacques Perrier, Wissenschaftsautor in Paris

» [spektrum.de/artikel/1485125](http://spektrum.de/artikel/1485125)

Als britische Forscher 1992 nach der Ursache eines Ausbruchs von Lungenentzündungen durch den Erreger *Legionella pneumophila* fahndeten, stießen sie in einem Kühlturm der Stadt Bradford auf einen bis dahin unbekanntem Mikroorganismus. Dieser befahl Amöben, die in dem Kühlsystem lebten. Wegen seiner Größe hielt man ihn für ein parasitisches Bakterium und nannte ihn daher *Bradfordcoccus*. Dass es sich in Wahrheit um

ein Virus handelte, entdeckten erst 2003 zwei Forschungsteams: das von Didier Raoult vom Hôpital de la Timone in Marseille und unseres. Der Erreger wurde nun umgetauft in Mimivirus, nach englisch »microbe mimicking virus«: ein Virus, das Mikoben nachahmt, so dass sich die Amöben täuschen lassen und es als vermeintliche Nahrung aufnehmen. Und wir schlugen vor, es als bisher ersten bekannten Vertreter von »Riesenviren« zu verstehen, einer mutmaßlichen »Gruppe großer DNA-Viren«.

Nähere Untersuchungen ergaben bald, dass die Komplexität dieses Mimivirus, beispielsweise die seines Genoms, an die von einigen parasitischen Bakterien heranreicht. Aus den bis dahin bekannten Viren mit ihrer meist sehr bescheidenen genetischen Ausstattung sticht es in der Hinsicht völlig heraus. Viele von ihnen weisen nur die genetische Information für eine Hand voll Proteine auf. Dagegen kodiert die DNA des Mimivirus zirka 1000 verschiedene Enzyme und andere Moleküle. Die kleinsten Viren beschränken sich auf die allernotwendigsten Gene für ihre Verbreitungsprodukte, die Virionen, und überlassen deren Herstellung komplett der von ihnen infizierten Zelle. Größere klassische Viren – etwa Phagen, die Bakterien infizieren – können die Codes für immerhin bis zu einige hundert Proteine besitzen.

Seit der Entdeckung des Mimivirus haben Forscher rund zwei Dutzend weitere Riesenviren aufgespürt. Noch geben diese biologischen Objekte uns viele Rätsel auf, besonders

## AUF EINEN BLICK

### ZEUGEN SEHR FRÜHEN LEBENS?

- 1 Auf das erste Riesenvirus, das Mimivirus, stießen Forscher aus Marseille 2003 in Proben aus England. Seither haben sie gut 20 weitere solche Viren entdeckt, die sie in mehrere Familien unterteilen.
- 2 Charakteristisch ist das große Genom mit bis zu einigen tausend Genen. Dadurch können Riesenviren Teile ihrer Reproduktion selbst erledigen.
- 3 Womöglich entstanden die Riesenviren aus frühen zellulären Lebensformen und überlebten als Parasiten von Vorläufern der modernen Zellen.

SERIE  
**Neue Einblicke in die Welt der Viren**

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

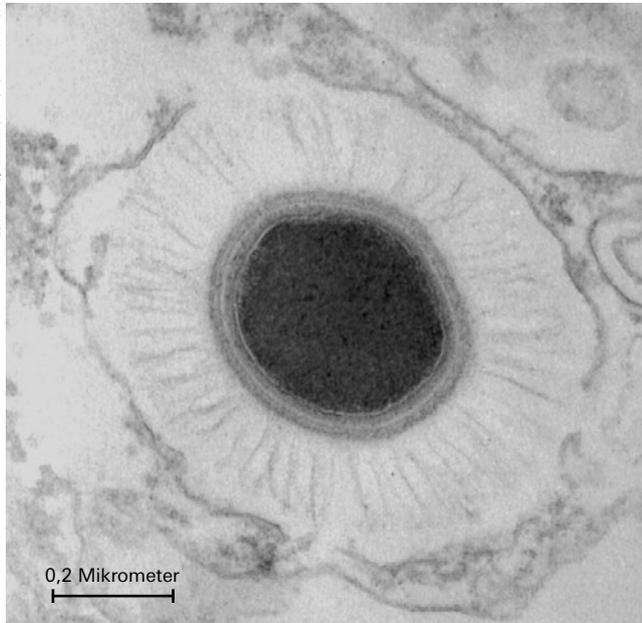
Teil 2: **September 2017**  
**Faszinierende Riesenviren**  
Chantal Abergel und Jean-Michel Claverie

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



1 Mikrometer

Das Pithovirus ist das größte bisher bekannte Riesenvirus: Es misst in der Länge 1,5 Mikrometer und ist sogar noch im Lichtmikroskop zu erkennen. Allerdings besitzt es nur Gene für knapp 500 Proteine, weniger als ein Viertel einiger anderer Virengiganten.



**Das Mimivirus, das erste entdeckte Riesenvirus, galt zunächst als Bakterium. Trotz seiner Größe und seiner zahlreichen Gene vermehrt es sich nach Virusmanier parasitisch in Zellen – in Amöben. Hier eine elektronenmikroskopische Aufnahme.**

bezüglich ihrer Einordnung in den Stammbaum des Lebens. Wie könnten die Giganten unter den Viren entstanden sein? Auf welche Weise sind sie mit anderen Viren und den verschiedenen zellulären Organismen verwandt? Bilden sie womöglich einen eigenen Ast im Stammbaum? Und weswegen sind sie überhaupt so groß? Auch wüssten wir gern, ob Riesenviren existieren, die Menschen infizieren.

Bezüglich ihrer Herkunft favorisieren wir eine ungewöhnliche Hypothese: Wir halten die Riesenviren für evolutionäre Verlierer, denen es dennoch zu überleben gelang. Sie könnten Abkömmlinge primitiver Zellen sein, die sich notgedrungen als Parasiten etablierten – und zwar als Bewohner von Zellen jener urzeitlichen Linie, aus denen die heutigen Lebewesen hervorgegangen sind.

Noch steht nicht fest, wie man die bisher gefundenen Riesenviren am besten klassifiziert, benennt und welche Viren außerdem noch dazugehören – darunter teils schon bekannte oder fern verwandte Gruppen. Je nach Zuordnung teilten die Forscher sie Anfang 2017 in vier beziehungsweise sechs systematische Familien ein. Anhand ihrer genetischen Verwandtschaftsverhältnisse und ihrer Größe lassen sich vier solche Großgruppen oder Typen gut unterscheiden. Alle Riesenviren dieser vier Familien vermehren sich in *Acanthamoeba*, einer sehr häufigen, im Erdboden sowie im Süß- und Salzwasser verbreiteten Amöbengattung.

Als Erstes wären die Mimi- oder Megaviridae zu nennen, die Familie, zu der das Mimivirus gehört. Eine weitere Familie bilden die Pandoraviridae unter anderem mit *Pandoravirus salinus*; eine weitere die Pithoviridae mit *Pithovirus sibericum*; und die vierte die Molliviridae; zu ihr gehört *Mollivirus sibericum*. Sie sind alle groß genug, um

im Lichtmikroskop noch sichtbar zu sein. Ihre Genome messen um die 1000 Kilobasen. Das Pithovirus kodiert etwa 500 Proteine, das Pandoravirus sogar mehr als 2000. (Im Folgenden nennen wir die Familien auch einfach »Mimiviren« und so weiter; *die Redaktion*.)

Dann gibt es noch zwei Typen etwas kleinerer, dennoch sehr großer Viren, deren Partikel man unter dem Lichtmikroskop allerdings nicht mehr erkennt. Denn diese messen lediglich 0,2 bis 0,25 Mikrometer – das Mimivirus dagegen 0,7, das Pandoravirus 1 und das Pithovirus sogar 1,5 Mikrometer (siehe **Spektrum** August 2017, S. 34). Zum einen handelt es sich um die Familie der Marseilleviridae, darunter das namensgebende Marseillevirus, von dem wir schon etwa zehn verschiedene Stämme kennen. Sie befallen ebenfalls *Acanthamoeba*. Zum anderen wurde 2015 das Faustovirus entdeckt, welches Amöben der Gattung *Vermamoeba* (früher *Hartmannella* genannt) befällt. Die Genome dieser beiden Gruppen sind deutlich mehr als 300 Kilobasen lang. Nach Ansicht verschiedener Experten rechtfertigt das ihre Zuordnung zu den Riesenviren.

### Verwandtschaft in aller Welt:

#### Der rasante Familienzuwachs bei den Mimiviren

Die Familie der Mimiviridae hat seit ihrer Entdeckung starken Zuwachs erhalten: Etwas größer als das Mimivirus ist das Mamavirus, und noch imposanter als dieses erscheint *Megavirus chilensis*, das wir in Meerwasserproben vor der chilenischen Pazifikküste fanden. Des Weiteren wurde aus Amöben von einem Kühlturm in Südfrankreich das Moumouvirus isoliert. Ebenfalls zu den Mimiviren zählen das Terravirus 1 und das Terravirus 2, die aus Bodenproben stammen. In einem Fluss Brasiliens hat man das Sambavirus entdeckt. Alle diese Mimiviren zeigen in elektronenmikroskopischen Aufnahmen den gleichen charakteristischen Aufbau (Bild links): Ihr Kapsid, ihre äußere Kapsel von zirka 0,5 Mikrometer Durchmesser, ist von einem faserähnlichen Material umhüllt. Und im Kapsid

## Alle bekannt gewordenen Riesenviren vermehren sich in Amöben, die im Erdboden oder im Süß- und Salzwasser verbreitet sind

ist eine opake, also undurchsichtige Struktur erkennbar, die ähnlich wie bei einem Zellkern von einer Doppelmembran umgeben ist. Sie enthält einen linearen DNA-Faden.

Das Besondere dieser Viren – wie überhaupt von Riesenviren – ist die hohe Anzahl an für Proteine kodierenden Genen. *Megavirus chilensis* besitzt davon mit 1123 zurzeit die meisten unter den Mimiviren. Bemerkenswerterweise benötigt es, um diese Proteine herzustellen, nicht die Hilfe von Enzymen im Kern der Wirtszelle. Vielmehr verfügt es über seine eigene Maschinerie zur Transkription – wie ebenfalls zur Genomreplikation und DNA-Reparatur. Vielleicht noch frappierender ist: Das Genom der Mimi-

viren weist sogar Gene für tRNA-Synthetasen auf, zentrale Enzyme der Proteinsynthese; diese sind für die so genannte Translation unverzichtbar, weil die tRNAs beim Zusammenbau des Proteinstrangs die passenden Aminosäuren anliefern.

Erwähnt werden sollten noch zwei kleinere Verwandte aus der erweiterten Familie der Mimiviren. Sie kommen im Meer vor und beeinflussen offenbar Planktonpopulationen: das *Phaeocystis-globulosa-Virus*, PgV-16T, und das *Cafeteria-roenbergensis-Virus*, CroV, die jeweils etwa 500 Gene besitzen.

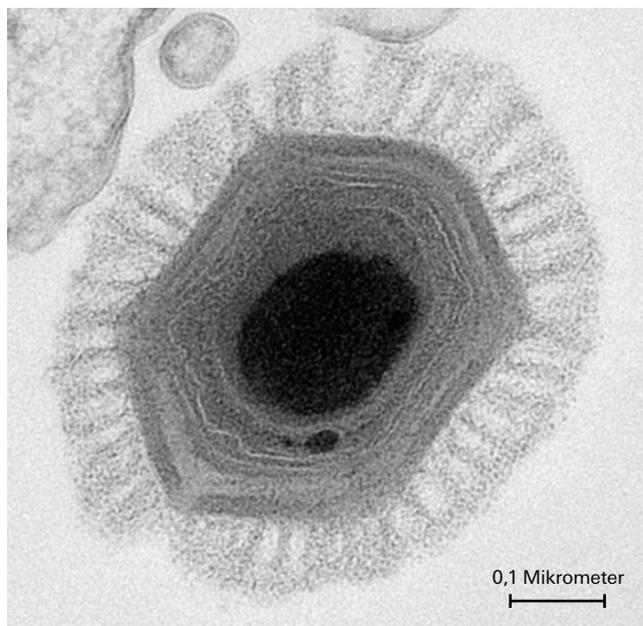
Die anderen Familien der Riesenviren haben nach aktuellem Kenntnisstand nicht so viele Mitglieder wie die Mimiviren. Doch auch sie bekommen immer mehr Zuwachs. Die ersten beiden Angehörigen der Pandoraviren entdeckte unser Team 2013: *Pandoravirus salinus* stammt (wie das erwähnte *Megavirus chilensis*) aus dem Pazifik vor der chilenischen Küste; und *Pandoravirus dulcis* aus einem Teich auf dem Gelände der La Trobe University in Melbourne (Australien). Außerdem wissen wir noch von wenigstens sechs weiteren Familienmitgliedern, die aber erst näher charakterisiert werden müssen.

Unter dem Elektronenmikroskop betrachtet sehen die Partikel der Pandoraviren völlig anders aus als die der Mimiviren. Ihre längliche Form erinnert an antike Amphoren – daher ihr Name: In der griechischen Mythologie öffnet Pandora ein Gefäß, aus dem die Plagen entweichen und über die Welt kommen. Die »Amphore« von Pandoraviren ist von einer dicken Hülle umgeben, gut einen Mikrometer lang und halb so dick. Über eine Öffnung an einem Ende gelangt das virale Erbgut in die Wirtszelle. Eine Struktur, die an einen Zellkern erinnert, weisen die Pandoraviren nach heutigem Wissen nicht auf. *Pandoravirus salinus* besitzt genetische Codes für mehr als 2550 Proteine. Von denen sind gut 90 Prozent noch nicht in Sequenzdatenbanken erfasst – ein Zeichen dafür, wie wenig wir von der Vielfalt biologischer Objekte wissen. Trotz ihres Riesengenoms voller unbekannter Gene gleichen die Pandoraviren den klassischen DNA-Viren insofern, als sie wie diese auf Funktionen des Kerns ihrer Wirtszelle angewiesen sind, um ihr Erbgut zu vermehren und zu transkribieren, somit Bauanleitungen für Proteine herzustellen.

### Nach 30000 Jahren wieder aufgetaut:

#### Neue Riesenviren aus dem sibirischen Permafrostboden

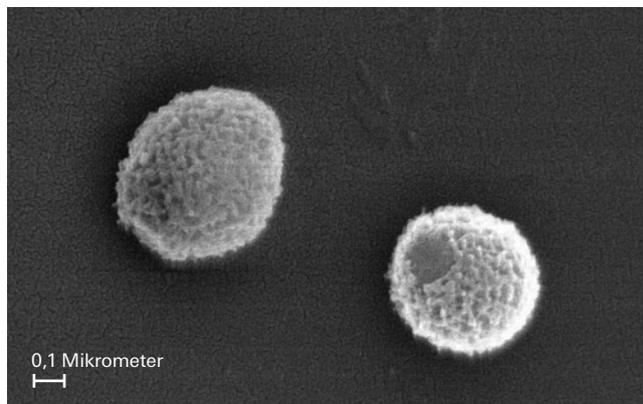
Die Entdeckung der Pithoviriden 2014 war unserer 2012 begonnenen Zusammenarbeit mit dem kurz danach plötzlich verstorbenen Geokryologen David Gilichinsky von der russischen Akademie der Wissenschaften zu verdanken, einem der Pioniere der Mikrobiologie arktischer Böden Russlands. Wir wussten, dass Amöben der Gattung *Acanthamoeba* im Permafrostboden überleben können. Die Frage war, ob Riesenviren zusammen mit ihren Wirten solche Verhältnisse ebenfalls zu überstehen vermögen. Um das herauszufinden, stellte uns Gilichinsky Proben von seit 30000 Jahren gefrorenem sibirischem Boden zur Verfügung. Ein paar Gramm davon gaben wir zu Laborkulturen von Amöben, die quasi als Köder für eventuell in den Proben vorhandene Riesenviren dienen sollten. Und tat-



IGS CNRS-AMU, MIT FROL GEN, VON CHANTAL ABERGEL



IGS CNRS-AMU, MIT FROL GEN, VON CHANTAL ABERGEL

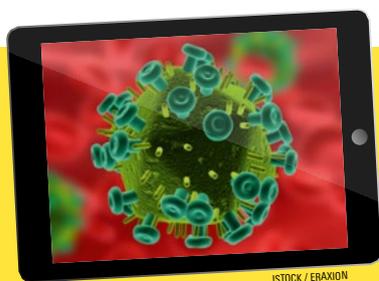


IGS CNRS-AMU, MIT FROL GEN, VON CHANTAL ABERGEL

Zu den Mimiviren zählt auch das Megavirus (oben). Alle seine Vertreter weisen ein dick umhülltes Kapsid mit einem DNA-Faden auf. Die länglichen Pandoraviren (Mitte) bilden eine eigene Familie. Eine nah mit ihnen verwandte Familie sind die Molliviren (unten). Das erste aufgespürte Mollivirus entstammte derselben Permafrostbodenprobe wie das erste Pithovirus.

sächlich: Die Amöben starben scharenweise ab, während gleichzeitig in rasch wachsender Anzahl amphorenförmige Mikropartikel auftraten.

Zuerst hielten wir sie für neue Pandoraviren. Allerdings erschienen die länglich ovalen Partikel im Elektronenmikroskop größer: Die Virionen maßen in der Länge mindestens 1,2 Mikrometer, bei einem halben Mikrometer Dicke. Die nähere Betrachtung zeigte, dass sie von einer recht dicken, gebändert wirkenden Hülle umkleidet waren und im Innern ein kleine, opake Kugel aufwiesen, in der das ringförmige Genom steckte. Das gesamte Gebilde sah aus,



## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/viren](http://spektrum.de/t/viren)

als wäre es an einem Ende mit einem Pfropfen verstopft. Nach dem griechischen Wort für Gefäß, »pithos«, nannten wir diese Giganten *Pithovirus sibiricum*.

Dieses Virus gehört ganz klar zu einer eigenen, neuen Familie, denn sein Genom unterscheidet sich grundlegend von denen der Pandora- und der Mimiviren. Trotz der herausragenden Größe der Partikel kodiert es lediglich für 467 Proteine. Im Vergleich zu den übrigen bisher bekannten Riesenviren ist das ausgesprochen wenig. Anders als die Pandoraviren verfügt *P. sibiricum* jedoch selbst über sämtliche notwendigen Funktionen zur Reproduktion seines Genoms und zur Expression seiner Gene, benötigt dazu also keine Enzyme im Kern der Wirtszelle. Für die Herstellung von Proteinen muss aber auch dieses Riesenvirus die Synthesemaschinerie seines Wirts außerhalb von dessen Zellkern nutzen. Folglich hatten wir das erste Mitglied einer weiteren Familie von Riesenviren entdeckt, die wir Pithoviridae nannten. Ein zweites *Pithovirus*, *P. massiliensis*, beschrieb Raoult's Team 2016.

Wir selbst isolierten aus derselben Permafrostbodenprobe, die *P. sibiricum* bewahrt hatte, 2015 noch ein anderes Riesenvirus. Dieses war eher kugelförmig und kleiner: Es hatte 0,5 bis 0,6 Mikrometer Durchmesser. Weil seine Partikel bei der Infektion von Amöben weich und anschmiegsam wirken, taufte wir es *Mollivirus sibiricum*. Trotz aller Unterschiede ist es entfernt mit den Pandoraviren verwandt: Es besitzt Codes für 523 Proteine, und für 83 davon finden sich bei Pandoraviren Entsprechungen.

Vermutlich kennen wir von den Riesenviren bisher lediglich einen winzigen Teil, denn sicherlich existieren sie in ungeahnter Vielfalt. Erst im Frühjahr 2017 entdeckten Mikrobiologen in einem österreichischen Klärwerk genetische Sequenzen, die sie unbekannteren Virusgiganten zuschreiben. Man darf gespannt sein, worauf die Forscher zukünftig so alles stoßen werden, wenn sie erst die potenziellen Wirtsorganismen gezielt durchmustern, etwa die in

den Meeren lebenden Einzeller. Wer weiß, womöglich gibt es sogar noch größere Vertreter als die schon bekannten.

Im Übrigen sieht es so aus, als würden die Viren, was ihre Ausstattung und ihre Fähigkeiten angeht, quasi ein Kontinuum darstellen: von den kleinen klassischen Viren, die ihre Gene nicht selbstständig transkribieren können, hin zu den wesentlich komplexeren, eigenständigeren Riesenviren. Letztere sind zwar auch nicht völlig autonom, bewältigen aber viele Schritte ihrer Vermehrung allein. Ihre Familien unterscheiden sich überdies im Grad dieser Ausstattung, so wie manche klassischen Viren wenige und andere deutlich mehr eigene Gene besitzen.

Trotzdem haben sie letztlich alle die gleiche Überlebens- und Vermehrungsstrategie: Sie müssen in eine Zelle, oder allgemeiner in einen biologischen Wirt, eindringen und auf dessen molekulare Ausstattung zugreifen, wenn auch, abhängig von ihrer eigenen Komplexität, in unterschiedlichem Ausmaß. Alle Viren sind somit zwangsläufig Parasiten etwa von Bakterien, von Archaeen – die manche anfangs für Bakterien hielten – oder von Organismen mit Zellkern wie Amöben oder Vielzellern. Und erstaunlicherweise gibt es sogar Viren von Riesenviren (siehe **Spektrum** April 2017, S. 27, und August 2017, S. 34). Die ähnliche Existenzweise besagt jedoch nicht, dass alle Viren denselben evolutionären Ursprung haben, und schon gar nicht, dass sie sämtlich denselben Evolutionsweg gegangen sind. Die Vielfalt ihrer Erscheinungsformen spricht eher für mehrere Wurzeln und diverse Entwicklungslinien.

## Abkömmlinge von präzellulären Entwicklungslinien mit vielen »verwaisten«, also einzigartigen Genen

Woher könnten nun die Riesenviren stammen? Über solche Fragen geben heutzutage genetische Stammbaurekonstruktionen Aufschluss, somit Gemeinsamkeiten und Ähnlichkeitsgrade von DNA-Sequenzen und von Proteinen. Solche Analysen erlauben tiefe Einblicke in die Vergangenheit biologischer Gebilde, auch von Viren. Genomvergleichen zufolge dürfte der Urahn der Mimiviridae bereits ein Zeitgenosse der ersten Zellen mit einem einfachen Zellkern gewesen sein, der ihr Genom enthielt. Aus Letzteren gingen die so genannten Eukaryoten – Organismen mit »echtem« Zellkern – hervor, innerhalb derer später die Tiere, Pflanzen und Pilze entstanden. Der Ursprung der Pithoviridae, Pandoraviridae und Molliviridae könnte sogar noch weiter zurückliegen, denn offenbar gehören sie zu seit Langem von den Mimiviridae getrennten Evolutionslinien. Frühe Vorfahren der Riesenviren von Amöben wären demnach sogar noch älter als die ersten Zellen mit einem Kern.

Und wie sahen jene Vorfahren der Riesenviren aus? Letztere haben zwar mit den Bakterien, Archaeen und Eukaryoten einige Gene gemeinsam. Zwei Drittel ihrer Gene ähneln aber in keinsten Weise irgendwelchen Erbfaktoren dieser Gruppen – ebenso wenig wie jenen von klassischen Viren. Wir nennen sie verwaiste Gene (»orphan genes«). Derart viele DNA-Sequenzen ohne erkennbare Verwandtschaft zu den drei großen Domänen des Lebens dürfte es nicht geben, wenn es sich bei ihnen oder ihren Vorgängern um ganz einfache Organismen gehan-

delt hätte, die sich wiederholt Erbmaterial von anderen Organismen angeeignet hätten, wie es die inflationistische Hypothese besagt. Dieses Szenario ist schon deswegen nicht plausibel, weil Parasitismus zwingend einen allmählichen Verlust von Genen zur Folge hat und keinen nennenswerten Zugewinn. Eine biologische Regel besagt: einmal Parasit, immer Parasit.

Mehr spricht daher für die reduktionistische Hypothese. Ihr zufolge stammen die Riesenviren von Vorläuferorganismen ab, die wesentlich mehr Gene besaßen als heute. Doch im Lauf ihrer Evolution zu Parasiten verloren sie bei der neuen Daseinsweise zwangsläufig viele davon unwiederbringlich. Eine beachtliche Anzahl funktioneller Erbsequenzen haben sie sich trotzdem bewahrt – bis zu mehrere tausend.

Wir glauben, dass die Riesenviren Abkömmlinge von präzellulären Entwicklungslinien sind, die vor mehr als 3,7 Milliarden Jahren entstanden waren. Für die Anfangszeit des Lebens stellen wir uns anarchische Verhältnisse mit Protozellen unterschiedlicher Organisation vor, deren Evolutionslinien nebeneinander existierten und verschiedenste Strategien des Wettbewerbs und der Zusammenarbeit erprobten. Das heißt: Bald bekämpften sich diese diversen frühen Zelllinien, bald kooperierten sie.

Irgendwann vermochte sich eine neue Linie zu etablieren und einen dominierenden Rang einzunehmen, die Vorteile bestimmter Allianzen miteinander verband. Diese Zellen vermehrten sich rasch und setzten sich schließlich gegenüber der Konkurrenz durch. Die Forscher nennen jene erfolgreiche Linie LUCA, den letzten gemeinsamen Vorfahren (last universal cellular ancestor) aller heutigen Zellen. Andere, LUCA unterlegene Linien gingen im Wettbewerb um die Nahrungsressourcen unter. Aber einige davon konnten vielleicht mit Einschränkungen überleben – um den Preis ihrer Selbstständigkeit: Sie wurden zu Parasiten der erfolgreichen Zellen.

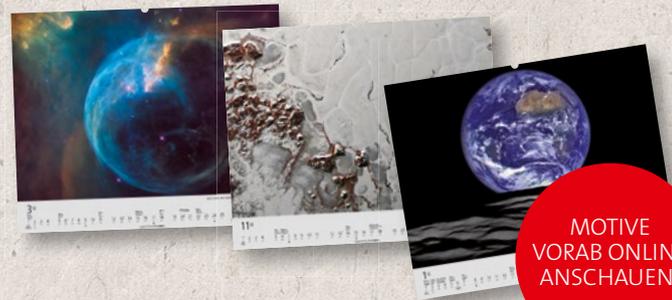
Die heutigen Riesenviren wären in diesem Szenario quasi lebende Fossilien – Nachfahren vorzellulärer Linien aus einer Zeit vor LUCA. Ihre Ahnen retteten sich vor dem auch ihnen drohenden Untergang vor 3,7 Milliarden Jahren, indem sie sich an eine parasitäre Lebensweise anpassten. Gewisse Enzyme für die Proteinsynthese, über die einige Megaviren verfügen, dürften sich noch aus der Zeit davor herleiten. Falls unsere Vorstellung zutrifft, lassen sich bei den Riesenviren vielleicht sogar Spuren von ganz ursprünglichen Stoffwechselwegen finden, die das moderne zelluläre Leben nicht mehr aufweist. ◀

#### QUELLEN

**Abergel, C. et al.:** The Rapidly Expanding Universe of Giant Viruses: Mimivirus, Pandoravirus, Pithovirus and Mollivirus. In: FEMS Microbiology Reviews 39, S. 779–796, 2015 (Federation of European Microbiological Societies)

**Claverie, J.-M., Abergel, C.:** Giant Viruses: The Difficult Breaking of Multiple Epistemological Barriers. In: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences 59, S. 89–99, 2016

**Claverie, J.-M., Abergel, C.:** Les virus géants: État des connaissances, énigmes, controverses et perspectives. In: Médecine/Sciences 32, S. 1087–1096, 2016



**STERNE UND WELTRAUM**

## DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2018

**Sterne und Weltraum** präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wie dem sichtbaren Licht oder dem Röntgenlicht. Die Aufnahmen stammen u. a. vom Weltraumteleskop Hubble und der Raumsonde New Horizons. Highlight ist diesmal der Vorbeiflug an Pluto und seinem Mond Charon.

**Zusätzlich** bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2018 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte.

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

### Hier können Sie bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

[sterne-und-weltraum.de/kalender](http://sterne-und-weltraum.de/kalender)

E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

# GENETIK MITNICHTEN TÖDLICHE MUTATIONEN

**Zehntausende menschliche Genome liegen heute sequenziert und analysiert vor. Das ermöglicht Forschern immer aussagekräftigere Erbgutvergleiche. Viele Genvarianten, die bislang als krank machend oder gar tödlich galten, stellen sich dabei als eher harmlos heraus: weil sie auch im Genom vieler Gesunder vorkommen!**



Erika Check Hayden berichtet für »Nature« aus San Francisco.

» [spektrum.de/artikel/1485129](https://spektrum.de/artikel/1485129)

Im Jahr 2010 musste Sonia Vallabh erleben, wie ihre Mutter einer seltenen Erbkrankheit erlag – der tödlichen familiären Insomnie. Diese Krankheit wird autosomal-dominant an die Nachkommen weitergegeben und führt dazu, dass fehlgefaltete Prionen ab dem mittleren Erwachsenenalter im Gehirn verklumpen und das Gewebe zerstören. Einige Monate nach dem Tod ihrer Mutter ließ Vallabh ihr eigenes Erbgut untersuchen. Dabei stellte sich

heraus, dass sie eine defekte Kopie des Prionproteingens *PRNP* trägt. Die Genetiker fanden bei ihr die Mutation D178N – allem Anschein nach dieselbe, die auch die Erkrankung ihrer Mutter verursacht hatte. Dieser Befund war niederschmetternd. Erste Symptome des Leidens treten typischerweise im Alter von etwa 50 Jahren auf, gefolgt von raschem Verfall mit unvermeidlich tödlichem Ausgang binnen weniger Jahre.

Vallabh, damals 26 Jahre alt, war allerdings nicht bereit, sich ihrem Schicksal kampflos zu fügen. Sie und ihr Ehemann Eric Minikel kündigten ihre Jobs und schrieben sich für ein Aufbaustudium Biologie ein. Ihr Ziel war klar: so viel wie möglich über die tödliche familiäre Insomnie herausfinden und darüber, wie sie sich aufhalten lässt. Vor allem wollten Vallabh und Minikel klären, ob die Mutation D178N tatsächlich die Ursache ist.

Noch vor wenigen Jahren hätten sie die Frage nicht so gezielt stellen können. Doch die medizinische Genetik durchläuft gerade einen atemberaubenden Wandel. Mit enormem Tempo fördert die Genomforschung seit Beginn des 21. Jahrhunderts tausende Genmutationen zu Tage, die mit Krankheit und Behinderung einhergehen. In vielen Fällen ist der Zusammenhang von Mutation und Erkrankung gut dokumentiert und empirisch sicher belegt. Oft stellt sich jedoch auch heraus, dass Mutationen, die zunächst als gefährlich oder sogar tödlich eingestuft werden, in Wirklichkeit ziemlich harmlos sind. Solche »Schafe im Wolfspelz« demaskiert zu haben, ist vor allem das Verdienst des Exome Aggregation Consortium (ExAC), eines der

## AUF EINEN BLICK SCHAFE IM WOLFSPELZ

- 1 Das Genom jedes Menschen enthält durchschnittlich 54 Mutationen, die nach herkömmlichem Verständnis krank machen oder den Tod bringen. Sie tun es aber offensichtlich nicht.
- 2 Erbgutanalysen zeigen immer deutlicher, warum das so ist. So haben Genetiker früher vielfach unterschätzt, wie verbreitet vermeintlich krank machende Mutationen tatsächlich sind.
- 3 Neue Genomdatenbanken wie ExAC und gnomAD enthalten die Sequenzen zehntausender Menschen. Das erlaubt wesentlich aussagekräftigere Untersuchungen als früher.

größten Projekte der Genomforschung, die je aufgelegt wurden.

Die Idee hinter ExAC ist im Grunde simpel. In einer Datenbank sammeln die Forscher so genannte Exomsequenzen – also die »Buchstabenfolgen« jener Teile des menschlichen Erbguts, in denen die Bauanleitungen für Proteine stecken. Hierbei hat sich eine riesige Informationsmenge angehäuft: Die Datenbank enthält Exomsequenzen von mehr als 60 000 Menschen. Das erlaubt sehr umfangreiche Sequenzvergleiche und hilft zu klären, wie sehr sich Exome von Mensch zu Mensch unterscheiden. Dies wiederum hat enorme Auswirkungen auf die Biomedizin, denn es liefert zahlreiche neue Erkenntnisse zur Bedeutung einzelner Gene und ihrer Proteinprodukte, und es beleuchtet den Zusammenhang zwischen individuellen Erbanlagen und Krankheiten.

ExAC stellt die Humangenetik »auf den Kopf«, wie es Genetiker David Goldstein von der Columbia University in New York City ausdrückt. Statt bei einer Krankheit oder

einem Merkmal zu beginnen und dann dessen genetische Ursache(n) herauszufinden, starten die Forscher nun bei möglicherweise relevanten Mutationen und untersuchen, wie diese sich auf ihre Träger auswirken.

### **Riesige Datenbanken erlauben Aussagen darüber, wie häufig eine Mutation in der Bevölkerung vorkommt**

Familien, die mit potenziellen Erbkrankheiten konfrontiert sind, kann ExAC zuverlässigere Informationen liefern. Die bereits erwähnte Mutation D178N beispielsweise stand in starkem Verdacht, eine Prionkrankheit auszulösen, da sie bei etlichen Erkrankten nachgewiesen wurde, aber nie bei Gesunden. Es gab allerdings keine Erkenntnisse darüber, wie oft die Mutation in der Gesamtbevölkerung tatsächlich auftritt. Käme sie deutlich häufiger vor als die Prionkrankheit, dann wäre Vallabhs Risiko, an letaler familiärer Insomnie zu erkranken, viel niedriger einzuschätzen als vorher vermutet. »Wir mussten daher den Anteil der Gesunden ermitteln, die die Mutation tragen«, sagt Minikel.

**Sonia Vallabh bekam vor einigen Jahren mitgeteilt, dass sie eine Mutation trägt, die mutmaßlich eine tödliche Erkrankung auslöst. Seither versuchen sie und ihr Mann Eric Minikel herauszufinden, wie groß die Gefahr wirklich ist.**



FOTO: MARIA NEMCHUK MIT FRÜHL. GEN. VOM BROAD INSTITUTE

Und hierfür sind die Forscher auf große Genomdatenbanken angewiesen.

Eigentlich wurde ExAC aus einer Frustration heraus geboren. 2012 begann der Genetiker Daniel MacArthur, am Massachusetts General Hospital in Boston über Mutationen zu forschen, die seltene Muskelerkrankungen auslösen. Hierzu wollte er Genomsequenzen von Patienten und Gesunden vergleichen. Fände er Veränderungen des Erbguts, die bei Ersteren häufiger auftreten als bei Letzteren, so verursachten diese möglicherweise die Erkrankung, postulierte er. Doch MacArthur standen nicht genügend Sequenzdaten von gesunden Menschen zur Verfügung. Obwohl zu diesem Zeitpunkt bereits mehrere tausend menschliche Exome sequenziert worden waren, hatte sie noch niemand in einem standardisierten Datensatz zusammengeführt, der entsprechende Vergleiche erlaubt hätte.

Also rief der Genetiker seine Forscherkollegen in aller Welt dazu auf, ihre Exomsequenzdaten mit seinen zu teilen. Er war der Richtige dafür, da er schon früh die sozialen Netzwerke für sich entdeckt hatte. Seine Blogbeiträge und Twitterkommentare hatten ihn bekannt gemacht und ihm eine Autorität verschafft, die für einen jungen Wissenschaftler ungewöhnlich ist. Zudem arbeitete er am Broad Institute in Cambridge, Massachusetts, einer Institution mit enormen Kapazitäten zur Genomsequenzierung. Tatsächlich überzeugte MacArthur zahlreiche Kollegen von seinem Anliegen, und es kamen Sequenzinformationen zehntausender Exome zusammen.

Diesen riesigen Berg auszuwerten, war jedoch alles andere als trivial. Denn die Rohdaten der diversen Sequenzierungen waren mit unterschiedlichen Computerprogrammen analysiert worden, darunter auch veralteten. Das brachte jede Menge Artefakte in den kombinierten Datensatz hinein. MacArthur musste das Ganze also irgendwie vereinheitlichen. Das Broad Institute hatte zwar eine Software entwickelt, die das im Prinzip leisten konnte, doch war sie nicht dafür ausgelegt, eine solche Informationsmenge zu bewältigen. MacArthur und sein Team arbeiteten daher eng mit den Programmierern am Institut zusammen, um die Softwarefähigkeiten entsprechend zu erweitern. »Das waren anstrengende 18 Monate«, erinnert sich der Genetiker, »wir tappten in jede nur denkbare Falle hinein und konnten nie auf existierende Lösungen zurückgreifen.« Doch am Ende war es geschafft und ExAC auf der Welt.

Unterdessen erlernte Sonia Vallabh am Massachusetts General Hospital das Arbeiten mit Stammzellen, während ihr Mann Eric Minikel Bioinformatik studierte. Im April 2013 traf er sich mit MacArthur und erläuterte ihm, warum sie sich so sehr für die Mutation D178N interessierten – insbesondere für ihr Vorkommen bei gesunden Menschen. Minikel verband große Hoffnungen mit MacArthur: »Ich dachte, wenn ich ihn dazu bringen könnte, nur eine halbe Stunde über das Problem meiner Frau nachzudenken, könnte uns das einen Riesenschritt weiterbringen.« Schließlich durchforstete ein Mitarbeiter MacArthurs den ExAC-Datenpool, der damals etwa 20 000 Exomsequenzen umfasste. Vallabhs Mutationsmuster ließ sich darin nicht

finden. Das war keine gute Nachricht, doch Minikel gab nicht auf und überzeugte MacArthur sogar, ihn ins Team zu nehmen.

Im Juni 2014 war der Datensatz erheblich angewachsen und enthielt nun die Exomsequenzen von 60 706 Individuen verschiedener ethnischer Herkunft, was deutlich aussagekräftigere Analysen erlaubte. Im Oktober 2014 stellten MacArthur und seine Kollegen ExAC auf der Jahreskonferenz der American Society of Human Genetics (ASHG) vor. Mediziner und Genetiker erkannten sofort das Potenzial, das darin steckt. Denn bis dahin hatten sie eine Mutation immer dann als potenziell krank machend eingestuft, wenn sich diese bei Erkrankten nachweisen ließ, die Krankheit prinzipiell verursachen konnte und im Genom von Gesunden nicht auftrat. Dieses Verfahren war fehleranfällig, denn die Genomsequenzen gesunder Individuen stammten hauptsächlich von Personen europäischer Abstammung, was die Ergebnisse der Erbgutvergleiche verzerrte.

Im August 2016 berichtete MacArthurs Team in der Fachzeitschrift »Nature« über eine groß angelegte Analyse des ExAC-Datenpools. Das Fazit dieser Untersuchung: Viele Mutationen, die zuvor als potenziell gefährlich gegolten hatten, sind es tatsächlich wohl gar nicht. Unter anderem prüften die Forscher 192 vermeintlich krank machende Sequenzvarianten, von denen sich die meisten bei genauer Betrachtung als ziemlich weit verbreitet herausstellten (auch bei Gesunden) und daher wohl eher harmlos sind. Nur bei 9 dieser Varianten ließ sich der Verdacht auf Pathogenität belastbar belegen.

Solche Arbeiten könnten die medizinische Praxis unmittelbar beeinflussen. In einem parallel erschienenen Fachartikel befasste sich der Genetiker Hugh Watkins von der

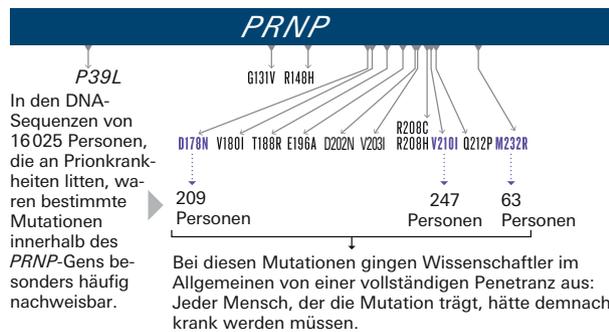
## Nur bei 9 von 192 vermeintlich krank machenden Sequenzvarianten ließ sich der Verdacht belastbar belegen

University of Oxford mit Genvarianten, die als mögliche Ursache bestimmter Herzmuskelkrankheiten gelten, so genannter Kardiomyopathien. Bleibt eine solche Krankheit unerkannt, kann sie zum plötzlichen Tod führen – daher werden Familienangehörige von betroffenen Patienten oft auf entsprechende Erbgutmuster hin untersucht. Stellt sich heraus, dass sie genetisch vorbelastet sind, raten ihnen Mediziner mitunter dazu, sich einen Defibrillator einsetzen zu lassen, um eventuell auftretende Herzrhythmusstörungen zu unterbinden.

Watkins durchforstete die ExAC-Datenbank nach diesen Genvarianten und fand heraus, dass etliche davon bei gesunden Menschen viel zu oft vorkommen, um als krank machend gelten zu können. Vor Watkins' Untersuchung wurden mehr als 60 Gene verdächtigt, in mutierter Form eine Kardiomyopathie zu verursachen; für 40 davon konnte der Genetiker diesen Zusammenhang nun ziemlich sicher

## Tödliche Mutationen, die keine sind

Bei Prionkrankheiten handelt es sich um seltene neurodegenerative Erkrankungen, hervorgerufen von fehlgefalteten Prionproteinen. Etwa 63 Mutationen im Prionprotein *PRNP* haben Forscher mit solchen Leiden in Verbindung gebracht. Es ist jedoch sehr schwer abzuschätzen, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Mutation zum Krankheitsausbruch führt, welche »Penetranz« sie also besitzt. Der Datensatz des Exome Aggregation Consortium (ExAC) kann hierbei helfen.



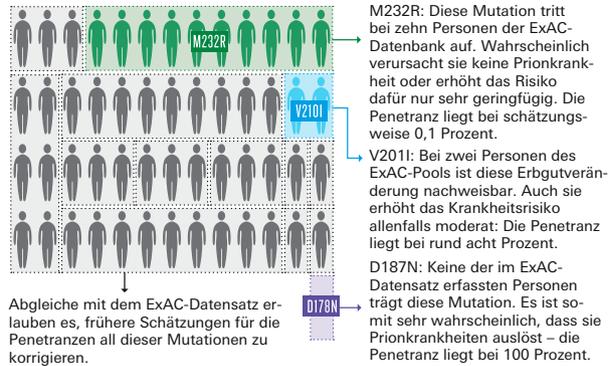
## ExAC-Analysen

Häufigkeit von Prionkrankheiten:  jährlich zwei Neuerkrankungen pro eine Million Menschen.

Der ExAC-Datensatz enthält die proteinkodierenden DNA-Sequenzen von 60 706 Menschen.

Erwartete Zahl der Personen, die ein mutiertes *PRNP*-Gen tragen und deren Genomsequenzen im ExAC-Pool hinterlegt sind: 1,7

Tatsächliche Zahl der Personen, die ein mutiertes *PRNP*-Gen tragen und deren Genomsequenzen im ExAC-Pool hinterlegt sind: 52



ausschließen. Das Ergebnis schlug in Fachkreisen hohe Wellen. Denn es bedeutete, dass Menschen mit einem vermeintlich erhöhten Krankheitsrisiko wohl tatsächlich gar keiner größeren Gefahr ausgesetzt gewesen und daher übertherapiert worden waren.

Selbst Mutationen, bei denen ein kausaler Zusammenhang zu Erkrankungen als gesichert galt, können wieder auf den Prüfstand kommen. Zum Beispiel im Fall des *PRNP*-Gens. Manche Mutationen in dieser Erbanlage lösen zwar unzweifelhaft Prionkrankheiten aus, doch andere sind, im Licht der neuen Daten betrachtet, anscheinend ungefährlich oder erhöhen das Risiko nur geringfügig (siehe »Tödliche Mutationen, die keine sind«, oben). Um herauszufinden, wie hier die Mutation D178N einzuordnen ist, erfassten Vallabh und Minikel im Jahr 2016 die genetischen Daten von mehr als 16 000 Personen, bei denen eine Prionkrankheit diagnostiziert worden war, und verglichen sie mit Sequenzen von beinahe 600 000 anderen Individuen – einschließlich derer, die im ExAC-Datenpool erfasst sind.

Allein in der ExAC-Population fanden sich 52 Personen mit *PRNP*-Mutationen, welche mutmaßlich mit Prionkrankheiten in Verbindung stehen. Auf Grund des seltenen Auftretens dieser Krankheiten wären statistisch nur zwei Mutationsträger zu erwarten gewesen. Wie Minikel errechnete, erhöhen einige vermeintlich tödliche *PRNP*-Sequenzvarianten das Erkrankungsrisiko nur geringfügig, andere wohl überhaupt nicht.

Solche Erkenntnisse sind für Menschen wie Alice Uflacker sehr wichtig. 2011 war ihr Vater mit 62 Jahren an

der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit gestorben, einer Prionkrankheit, die zu rasch fortschreitendem geistigen und körperlichen Verfall führt. Später erfuhr Uflacker, dass sie selbst eine Mutation im *PRNP*-Gen namens V210I trägt, die mutmaßlich zu den Ursachen der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit zählt. Drei Jahre später hatte sie Kontakt mit Minikel aufgenommen, der ihr berichten konnte, V210I steigere das Erkrankungsrisiko höchstens geringfügig. Diese Information erleichterte sie sehr und war zudem plausibel, denn Uflackers Großmutter war 93 Jahre alt geworden, obwohl auch sie die Mutation getragen hatte.

Vallabh und Minikel allerdings blieb eine solche Glücksnachricht versagt. D178N tauchte in keiner der von ihnen untersuchten Sequenzen auf und löst daher wohl tatsächlich die Prionkrankheit aus. Das Paar hatte so etwas allerdings schon länger vermutet. »Unser unguter Verdacht erhärtete sich umso mehr, je tiefer wir uns einarbeiteten«, schildert Minikel.

## Datenbankanalyse deutet auf weitgehend unveränderliche Sequenzabschnitte hin

ExAC verrät noch viel mehr über das menschliche Genom. MacArthur und sein Team fanden 3200 Gene, die in dem gesamten Datenpool der Exomsequenzen fast niemals in stark mutierter Form auftreten. Ein Zeichen dafür, dass diese Erbanlagen sehr wichtig für den Organismus sind. 72 Prozent von ihnen ließen sich bisher nicht mit gesundheitlichen Komplikationen in Verbindung bringen. Das lässt einige Forscher rätseln, ob diese Gene vielleicht eine bisher unerkannte Rolle im Krankheitsgeschehen spielen –

oder aber so bedeutsam sind, dass deutliche Veränderungen in ihrer Sequenz den betroffenen Menschen schon als Embryo sterben lassen.

Umgekehrt identifizierte die Gruppe fast 180 000 Mutationen, die so schwerwiegend sind, dass das davon betroffene Protein seine Funktion aller Wahrscheinlichkeit nach vollständig verliert. Eine seit Langem etablierte Methode der Genetik ist das gezielte Ausschalten (»Knock-out«) einzelner Gene in Versuchstieren, etwa Labormäusen. Indem die Forscher beobachten, welche Merkmale die so manipulierten Tiere ausprägen, können sie auf die Funktion des inaktivierten Gens rückschließen. Solche Experimente sind bei Menschen natürlich ausgeschlossen. Anhand der gefundenen Mutationen im ExAC-Datensatz können Forscher jedoch analysieren, wie sich natürlich auftretende Knockouts auswirken. Das verschafft neue Einblicke in die Entstehung menschlicher Krankheiten und könnte innovative Therapieansätze liefern. MacArthur und andere Forscher klären jetzt ab, welche menschlichen Knockout-Mutationen vorrangig untersucht werden sollten und wie man deren Träger (deren Genomsequenzen im ExAC-Pool hinterlegt sind) am besten erreichen kann, um gemeinsam mit ihnen weiter gehende Analysen durchzuführen.

Doch zunächst haben die Wissenschaftler das ExAC-Projekt in die zweite Phase gebracht. Anfang 2017 gaben sie den Start der Genome Aggregation Database (gnomAD) bekannt. Diese enthält Exomsequenzen von mehr als 120 000 Personen, also doppelt so viele wie ExAC, und zudem die Sequenzen der vollständigen Genome von 15 500 Individuen. Das erlaubt es, künftig auch Mutationen in regulatorischen DNA-Abschnitten zu untersuchen, die außerhalb des Exoms liegen.

ExAC und gnomAD entwickeln sich derzeit zu Standardwerkzeugen der medizinischen Genetik. Klinische Labore in aller Welt konsultieren heute diese Datenpools, wenn sie klären wollen, ob ein bestimmter Gendefekt einen Patienten krank machen könnte. Taucht die Mutation im Datensatz häufig auf, ist sie wahrscheinlich nicht sehr gefährlich.

Einer derjenigen, die von diesem Instrument rege Gebrauch machen, ist der Genetiker Leslie Biesecker vom US National Human Genome Research Institute in Bethesda, Maryland. Er berichtet, die Nutzung der ExAC-Datenbank sei in der klinischen Praxis mittlerweile alltäglich: »Wir durchforsteten den Datensatz auf jede genetische Variante hin, deren medizinische Relevanz wir beurteilen möchten.« Zusammen mit anderen Genetikern beginnt er nun das ambitionierte Unterfangen, publizierte Erkenntnisse der Humangenetik mit den Ergebnissen von ExAC-Analysen abzugleichen, was aber noch Jahre dauern dürfte.

Die bisher vorliegenden ExAC-Untersuchungen haben endgültig bestätigt, was Goldstein und andere Forscher wiederholt angemahnt haben: Menschen mit nichteuropäischer Herkunft bei Sequenzvergleichen außer Acht zu lassen, hemmt den Erkenntnisfortschritt – nämlich dazu, wie Gene und Krankheiten zusammenhängen. Denn es bleibt dann stets ein großer Teil der genetischen Vielfalt des Menschen unberücksichtigt. Daher ist es zu begrüßen,

dass bisher unterrepräsentierte Gruppen in einschlägigen großen Untersuchungen – etwa der Precision Medicine Initiative in den USA mit einer Million Teilnehmern – künftig besser abgebildet werden. gnomAD beispielsweise enthält sowohl Exom- als auch Kompletengenomdaten von Afrikanern, Amerikanern, Asiaten, Finnen, anderen Europäern und aschkenasischen Juden.

Für Vallabh und Minikel brachten die ExAC-Analysen zwar einerseits entmutigende Gewissheit, andererseits aber auch viel versprechende Ansatzpunkte. Minikel hat

## Neuere Genomdatenbanken enthalten zunehmend auch die Erbgutsequenzen von Gruppen, die bisher unterrepräsentiert waren

drei Personen identifiziert, deren Mutationen wahrscheinlich eine oder beide Kopien des Prionproteingens *PRNP* stummschalten. Da diese Menschen anscheinend mit einer reduzierten Menge des Proteins oder ganz ohne dieses leben können, erscheint es möglich, einen Arzneistoff zu entwickeln, der das mutierte Protein in Vallabhs Körper aus dem Verkehr zieht und so die Prionverklumpung verhindert, ohne schwer wiegende Nebenwirkungen zu verursachen.

Minikel hat bereits Kontakt aufgenommen zu einem der drei Mutationsträger, einem in Schweden lebenden Mann. Dieser erklärte sich bereit, einige seiner Körperzellen den Forschern zur Verfügung zu stellen, damit sie daran Arzneistoffkandidaten testen können. Minikel und Vallabh sind jetzt der Gruppe des Biochemikers Stuart Schreiber am Broad Institute beigetreten. Dort arbeiten sie rund um die Uhr daran, Wirkstoffe zu identifizieren, mit denen sich die Prionkrankheit behandeln lässt.

Das Schicksal des Paares zeigt exemplarisch, welche Hürden es zu überwinden gilt, um Erkenntnisse aus ExAC-Analysen in echte medizinische Fortschritte zu übersetzen. »Für uns gibt es kein Zurück – da kämpfen wir uns jetzt durch«, betont Vallabh ihre feste Entschlossenheit. Sie ist nun Anfang 30 und wird in weniger als 20 Jahren das Alter erreichen, in dem ihre Mutter starb. Sie hat keine Zeit zu verlieren. ◀

### QUELLEN

**Lek, M. et al.:** Analysis of Protein-Coding Genetic Variation in 60 706 Humans. In: *Nature* 536, S. 285–291, 2016

**Minikel, E. V. et al.:** Quantifying Prion Disease Penetrance Using Large Population Control Cohorts. In: *Science Translational Medicine* 8, 322ra9, 2016

**Walsh, R. et al.:** Reassessment of Mendelian Gene Pathogenicity Using 7,855 Cardiomyopathy Cases and 60,706 Reference Samples. In: *Genetics in Medicine* 19, S. 192–203, 2017

© Nature Publishing Group

[www.nature.com](http://www.nature.com)

*Nature* 538, S. 154–157, 13. Oktober 2016



# FREISTETTERS FORMELWELT WAS SCHWARZE LÖCHER WIRKLICH SELTSAM MACHT

**Kosmische Monster, die gnadenlos alles ansaugen?  
Dieses Bild wird den wahren Eigenschaften der  
geheimnisvollen Himmelskörper nicht gerecht!**

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

» [spektrum.de/artikel/1485131](http://spektrum.de/artikel/1485131)

Wenn ich einen öffentlichen Vortrag gehalten habe, kann ich sicher sein, dass unter den Publikumsfragen eine über Schwarze Löcher ist – einerlei, was das eigentliche Thema des Vortrags war. Verständlich, denn diese Himmelskörper sind ebenso faszinierend wie mysteriös. Angesiedelt an der Grenze zwischen seriöser wissenschaftlicher Forschung und spektakulären Hypothesen, sind sie ein Standardelement der Science-fiction-Literatur. Sie stehen im Fokus des öffentlichen Interesses, lassen sich aber gleichzeitig ohne umfassende Kenntnisse der Mathematik kaum begreifen – und selbst dann nicht immer. Kein Wunder, dass es da sehr oft zu Missverständnissen kommt.

Am häufigsten treffe ich dabei auf das falsche Bild des Schwarzen Lochs als »Staubsauger«, der alles in seiner Umgebung gnadenlos ansaugt, verschluckt und nie wieder entkommen lässt. Um zu verstehen, warum es falsch ist, muss man sich mit dieser Formel beschäftigen:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Sie beschreibt den Schwarzschild-Radius  $r_s$ , der für den vereinfachten Fall eines nicht rotierenden Schwarzen Lochs mit dessen »Ereignishorizont« identisch ist. Diese Grenze hängt nur von der Masse  $M$  des Schwarzen Lochs ab; das  $G$  in der Formel ist die Gravitationskonstante und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit.

Der Ereignishorizont ist, vereinfacht gesagt, die Grenze, ab der ein Schwarzes Loch anfängt, seltsam zu werden. Ist man weit genug davon entfernt, passiert einem nichts. Würde man zum Beispiel die Sonne durch ein Schwarzes Loch gleicher Masse ersetzen, dann würden wir, abgesehen von der plötzlichen Dunkelheit und Kälte, nichts davon merken. So wie zuvor um die Sonne würde die Erde nun auf derselben Bahn um das Schwarze Loch kreisen. Sie würde vor

allem nicht »eingesaugt« werden. Warum auch? Die Masse hat sich ja nicht geändert, und die Erde spürt genau die gleiche Anziehungskraft wie zuvor.

Deren Stärke hängt aber nicht nur von der Masse ab, sondern auch vom Abstand. Je näher wir zum Beispiel der Sonne kommen, desto mehr spüren wir ihre Gravitationskraft. Die gesamte Masse der Sonne ist in einer Kugel mit einem Radius von etwa 700 000 Kilometern verteilt. Näher können wir dieser Masse also nicht kommen, und selbst wenn wir direkt an den Rand der Sonne rücken, liegt ein Teil ihrer Masse immer noch 1,4 Millionen Kilometer von uns entfernt am gegenüberliegenden Rand.

Um aus der Sonne ein Schwarzes Loch zu machen, muss man ihre Masse verdichten – wie stark, das lässt sich mit der Formel für den Ereignishorizont berechnen: Ein Schwarzes Loch mit der Masse der Sonne hätte einen Schwarzschild-Radius von nur noch drei Kilometern. Dem Schwerpunkt einer solchen Minisonne (die aber immer noch ihre gesamte Masse besitzt) können wir nun also viel näher kommen, weshalb wir auch eine viel stärkere Gravitationskraft spüren. Direkt am Ereignishorizont ist diese so stark, dass wir die Lichtgeschwindigkeit überschreiten müssten, um uns wieder zu entfernen. Das aber ist unmöglich: Wir sind gefangen und können nicht entkommen.

Ein Schwarzes Loch »saugt« also nicht – doch seine auf einen extrem geringen Raum komprimierte Masse sorgt dafür, dass man sich seiner gesamten Masse bis an den Ereignishorizont nähern kann. Und in diesem Fall passiert wirklich etwas.

Schwarze Löcher stecken noch voller weiterer schwer verständlicher und höchst faszinierender Phänomene. Um sie abschließend zu verstehen, sind nicht nur sehr viel komplexere Formeln nötig, sondern vermutlich auch ein ganz neues Verständnis von Mathematik, Physik und Astronomie.

# COMPUTERTECHNIK

## DIE PERFEKTE KÜNSTLICHE STIMME

Inzwischen kann eine Maschinenstimme die eines Menschen täuschend echt imitieren.

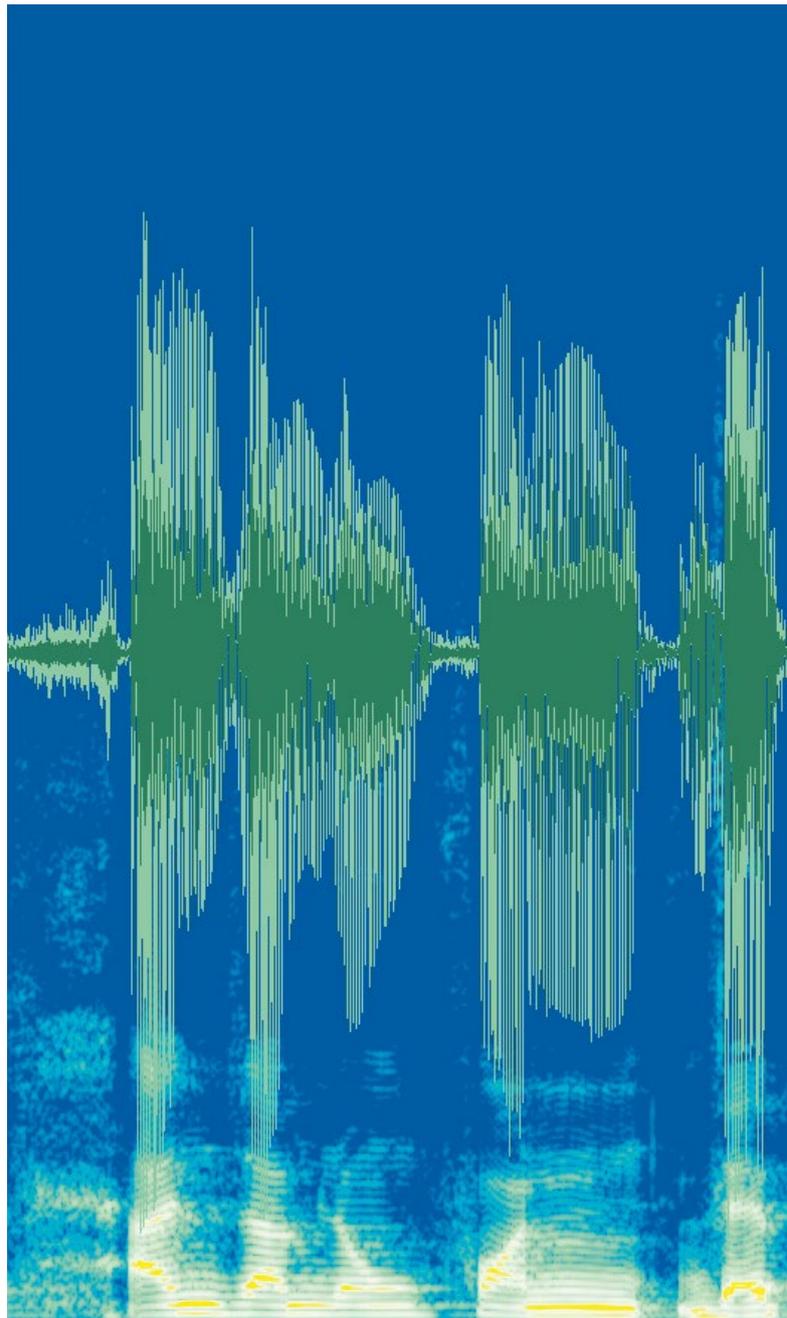


**Nicolas Obin** (links) ist Dozent an der Université Pierre et Marie Curie, wo er 2011 auch promovierte, und Forscher in der Arbeitsgruppe »Analyse et synthèse des sons« am Institut de Recherche et Coordination Acous-

tique/Musique (Ircam) im Centre Pompidou in Paris. **Axel Röbel** leitet diese Arbeitsgruppe; er promovierte 1993 an der Technischen Universität Berlin.

» [spektrum.de/artikel/1485133](http://spektrum.de/artikel/1485133)

Alle Sprachverarbeitung beginnt mit dem Schallsignal, das vom Mikrofon aufgenommen wird. Man erkennt kurze Pausen zwischen einzelnen Wörtern und eine längere zwischen zwei Sätzen. Unten im Bild das Ergebnis einer (lokalen) Fourier-Analyse: Ähnlich dem, was in der Hörschnecke im menschlichen Innenohr geschieht, wird das Signal in seine Anteile zu verschiedenen Frequenzen zerlegt. Die Frequenzen sind entlang der vertikalen Achse aufgetragen; die weißen und gelblichen Farbtöne kennzeichnen die Amplitude zur jeweiligen Frequenz.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

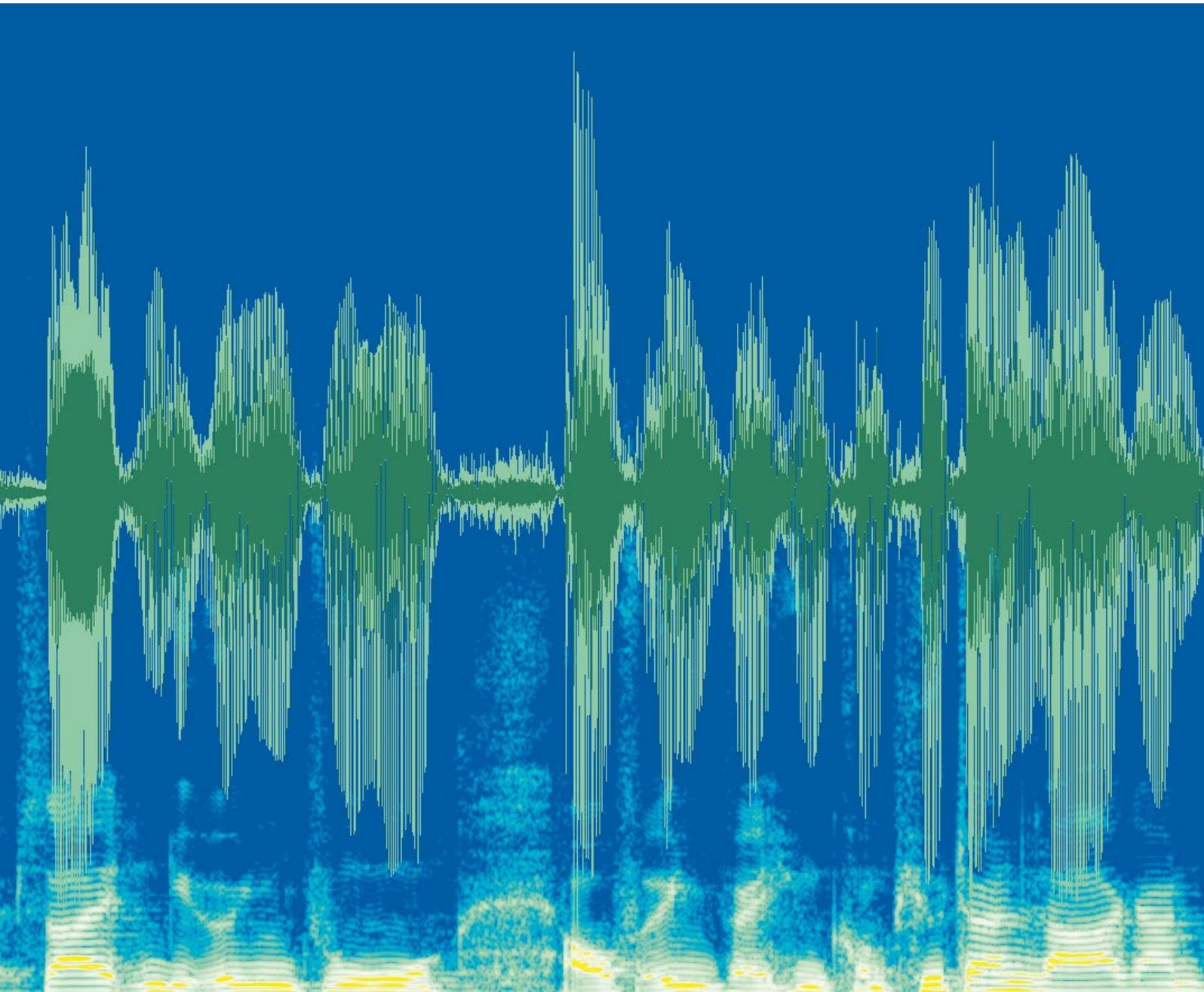
► Aristoteles hatte die Stimme »den Spiegel der Seele« genannt. Wir erkennen einander an der Sprechstimme, und sie ist Ausdruck unserer Persönlichkeit und unserer Gefühle. Bis vor Kurzem schien die gesprochene Sprache allein dem Menschen eigen zu sein, doch in den letzten 20 Jahren haben synthetische Stimmen einen großen Aufschwung genommen. Heute bilden sie einen wesentlichen Teil der Digitaltechnik.

An der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine verleiht die Stimme der Maschine so etwas wie Persönlichkeit oder gar Seele. In naher Zukunft werden wir überall auf synthetische Stimmen stoßen, nicht nur aus dem Smartphone in der Hosentasche. Und es wird zweifellos immer schwieriger werden, sie von echten menschlichen

Stimmen zu unterscheiden. Die Industrie investiert massiv in diesen Bereich, allen voran die Großunternehmen Google, Apple, Microsoft und Amazon.

Unsere Smartphones sind jetzt schon in der Lage, auf gesprochene Kommandos zu reagieren und mit synthetischen Stimmen zu antworten. Die Zukunft gehört der künstlichen Intelligenz, die Technik und Geräte in unseren Häusern steuert – allzeit bereit und in der Lage, sich lernend unseren sprachlichen Eigenheiten und Wünschen anzupassen. In Ansätzen leisten das bereits heute die Programme Google Assistant, Siri von Apple, Cortana von Microsoft und Alexa von Amazon.

An den zugehörigen Fragen arbeiten zahlreiche Forschungslabors, darunter unseres am Ircam (Institut de



Recherche et Coordination Acoustique/Musique) in Paris. Spezialität unseres Hauses ist die enge Anbindung an die Welt der Kultur, die in der Produktion von Musik, Kinofilmen und Videospielen ihren Ausdruck findet.

Während sich die IT-Giganten und viele Forschungsinstitutionen lange Zeit damit begnügten, ihre künstlichen Stimmen verständlich zu machen und für spezielle Anwendungen zu standardisieren, haben die Forscher des Ircam sich seit den 1980er Jahren auf die Frage konzentriert, was eine menschliche Stimme genau ausmacht: ihre Klangfarbe, ihre Individualität und ihre Ausdrucksstärke.

Im Lauf des letzten Jahrzehnts gelang es unserer Arbeitsgruppe insbesondere, die anfangs zwar verständlichen, aber ziemlich mechanisch tönenden Sprachgeneratoren zu natürlich und ausdrucksvoll klingenden Stimmen weiterzuentwickeln. Dieser Innovationsschritt erwuchs aus neuesten Erkenntnissen auf den Gebieten Signalübertragung, maschinelles Lernen und Linguistik. Inzwischen

können wir die Gestalt einer sprachlichen Äußerung getreuer wiedergeben, weil wir unsere Algorithmen zur Sprachanalyse und -synthese verbessert haben. So gelingt es uns, die Sprachmelodie an die grammatische Struktur des Textes anzupassen, was die neueren synthetischen Stimmen erheblich natürlicher klingen lässt. Verfahren des maschinellen Lernens und allgemein die Leistungssteigerung der Computer erleichterten uns die Aufgabe, unser umfangreiches Datenmaterial (jeweils mehrere Stunden Tonaufnahmen für Tausende von Stimmen) als Lernstoff für unsere Systeme zu nutzen.

### Aus alt mach jung, aus männlich weiblich, aus einheimisch auswärtig und umgekehrt – in der Sprache

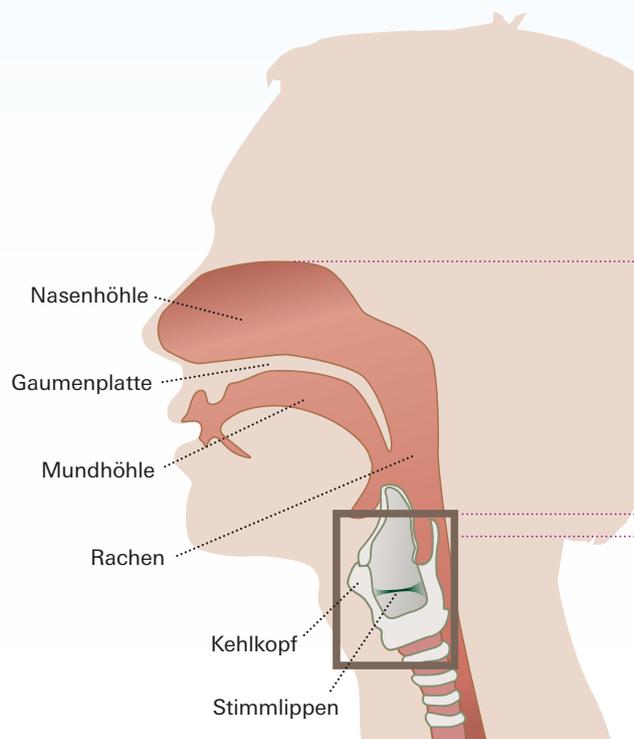
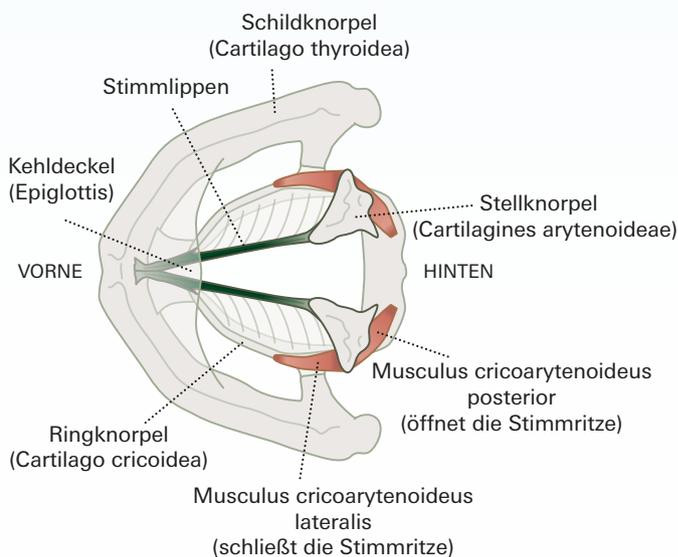
Unsere Software findet heute unter anderem bei Kinoproduktionen Anwendung. Mit ihrer Hilfe kann man eine Stimme durch Beimischung von feinen Details, Klangfarbe, individuellen Besonderheiten und Ausdruck regelrecht

## Wie die Stimme geformt wird

An der Stimmbildung sind zahlreiche Organe und Strukturen beteiligt. Sie lassen sich einteilen in erzeugende und modulierende Teile.

- Lungen und Luftröhre produzieren den Luftstrom, der die Stimmlippen in Schwingung versetzt. Diese bestimmen die Frequenz der erzeugten Töne.
- Der Resonanzkörper aus Kehlkopf, Rachenhöhle, Nasenhöhle und Mundhöhle moduliert die Amplituden der verschiedenen Obertöne.

### Kehlkopf (von oben)



modellieren. Wir verwandeln problemlos eine Männer- in eine Frauenstimme, eine junge in eine alte und umgekehrt. Wir sind in der Lage, unsere eigene Stimme so zu verändern, dass sie wie die einer anderen Person klingt. Unsere Computer und unsere Smartphones sind mit natürlich klingenden künstlichen Stimmen ausgestattet, ausdrucksstark und personalisierbar, fähig, jeden beliebigen Text zu sprechen.

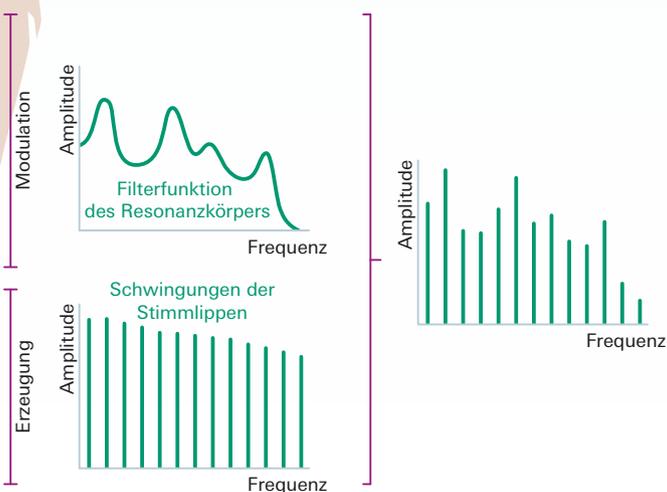
Künftig wird es möglich sein, Menschen, die ihre eigene Stimme verloren haben, einen Ersatz zu verschaffen (siehe »Auf der Suche nach der verlorenen Sprache«, S. 58), Simultanübersetzungen mit der eigenen Stimme sprechen zu lassen (siehe »Der Dolmetscher in der Westentasche«, S. 57), die Stimme zu wechseln wie die Frisur und im Alltag mit Robotern zu reden, deren Stimmen von menschlichen nicht zu unterscheiden sind.

Wie entsteht die menschliche Stimme? Die Quelle des Schalls sind die Stimmlippen im Kehlkopf, umgangs-

## AUF EINEN BLICK SPRACHSYNTHESE IM RECHNER

- 1 Mit dem Computer lassen sich Tonaufnahmen sprachlicher Äußerungen in kleine Einheiten zerlegen und zu neuen Äußerungen zusammensetzen.
- 2 Dabei können die Autoren die Klangfarbe der Stimme so verändern, dass zum Beispiel aus einer Männer- eine Frauenstimme wird.
- 3 Die neuesten Verfahren arbeiten mit abstrakten Modellen der Sprache. Mit ihrer Hilfe kann man künstliche Stimmen erschaffen, die von natürlichen kaum noch zu unterscheiden sind.

Die Diagramme zeigen in der Fourier-Darstellung (Amplitude in Abhängigkeit von der Frequenz) links unten den von den Stimmlippen erzeugten Schall, darüber die Wirkung des Resonanzkörpers, der manche Frequenzen verstärkt und andere abschwächt, sowie rechts das Produkt beider Funktionen: den Schall, der dem Mund entströmt.



sprachlich auch als Stimmbänder bezeichnet, obwohl sie mit Bändern eigentlich keine Ähnlichkeit aufweisen. Der Luftstrom, der aus der Lunge über die Luftröhre zum Kehlkopf gelangt, versetzt die Stimmlippen in Schwingung. Diese Vibrationen erzeugen Luftdruckschwankungen, die sich als Schallwellen ausbreiten und so einen Ton erzeugen. Der besteht aus einer Grundfrequenz, welche die wahrgenommene Tonhöhe bestimmt, und Vielfachen davon, den Obertönen (siehe »Wie die Stimme geformt wird«, links). Unregelmäßigkeiten der Vibration, die Spannung der Muskeln im Bereich der Stimmlippen, die Menge an durchströmender Luft sowie die entstehenden Turbulenzen beeinflussen die Qualität der Lautäußerung: weich oder angespannt, gepresst, geflüstert, rau, heiser, brüchig und so weiter.

Der im Kehlkopf entstandene Ton breitet sich über Luftröhre, Rachenraum, Mund- und Nasenhöhle aus. Die drei Hohlräume, zusammen als Vokaltrakt bezeichnet, wirken als Resonanzraum, Techniker würden sagen: wie ein Filter, der manche Obertöne verstärkt, andere dämpft und damit der Stimme ihre Klangfarbe verleiht – so individuell wie die Anatomie jedes Menschen.

Obendrein kann der Mensch die Form seines Vokaltrakts und damit den Klang seiner Stimme durch Bewegung seiner Artikulationsorgane, vorrangig Lippen, Zunge und Gaumensegel, verändern. Damit wird aus diesen Organen ein Instrument zur Kommunikation. Jede Sprache verfügt über ihr eigenes Sortiment an elementaren Lauten, den so genannten Phonemen. Im Deutschen sind das etwa 40: die Vokale und die Konsonanten, zu denen unter anderem die Verschlusslaute (Okklusive) wie b, d oder p und die Reibelauten (Frikative) wie f, sch oder s gehören.

Während ein Mensch Phoneme zu Silben, Wörtern und ganzen Sätzen zusammensetzt, ist sein Sprechapparat ständig in Bewegung. Zugleich variiert er mit Kehlkopf und Stimmlippen Tonhöhe und Lautstärke. Diese »Sprachmelodie« zusammen mit dem Rhythmus und gelegentlich der Stimmqualität (zum Beispiel flüsternd oder rau) hilft dem Sprecher, einzelne Wörter oder Phrasen hervorzuheben,

und gibt, ob er es will oder nicht, auch Auskunft über seine Absichten und Gefühle sowie über seine geographische wie soziale Herkunft.

Die individuelle Identität einer Stimme setzt sich also aus zwei Komponenten zusammen: der Klangfarbe und der Sprachmelodie. Um diese manipulieren zu können, braucht man für jede Komponente ein mathematisches Modell. Zu diesem Zweck haben Forscher an unserem Institut 2010 eine Software namens IrcamTools TRAX entwickelt. Das Computerprogramm verändert die Tonhöhe eines akustischen Signals und wendet Filter darauf an, welche die Klangfarbe modifizieren. Mit diesem Hilfsmittel ist es sehr einfach, die Stimme eines Mannes in die einer Frau zu verwandeln – und umgekehrt – oder aus der Stimme eines Erwachsenen die eines Jugendlichen zu machen.

Männer und Frauen haben unterschiedliche Körperproportionen, was sich auch auf ihre Stimme auswirkt. Die Stimmlippen des Mannes sind relativ lang (17 bis 25 Millimeter), ebenso sein Vokaltrakt (im Mittel 17 Zentimeter). Daraus folgt, dass Männer eine vergleichsweise tiefe Stimmlage haben (70 bis 160 Hertz) und eine dunklere Klangfarbe. Die Stimmlippen der Frau sind kürzer (12,5 bis 17,5 Millimeter) und ihr Stimmtrakt ebenfalls. Frauenstimmen sind daher höher (130 bis 300 Hertz) und klingen heller. Zudem verändert sich mit dem Körper auch die menschliche Stimme im Lauf des Lebens. Junge Menschen haben eine hellere Stimme, die im Erwachsenenalter dunkler wird und im Alter wieder etwas höher.

Wenn das Computerprogramm also Stimmhöhe und Klangfarbe modifiziert, scheint der Sprecher sein Geschlecht oder sein Alter zu verändern. Um die zittrige und

## Stimmenverwandlung

Mit den hier beschriebenen Techniken lässt sich die Stimme eines Menschen in die einer berühmten Persönlichkeit, eines jüngeren oder älteren Menschen verwandeln – oder auch in die eines Monsters. Im folgenden Beispiel wird die Stimme von Alice in die von Bernard umgesetzt. In den Sprechblasen stehen die senkrechten Balken für die Sprachmelodie, die Hintergrundfarbe für die Klangfarbe der Stimme.



Bernards Stimme wird über mehrere Stunden beim Sprechen von Texten aufgenommen.



Eine Software analysiert den von Bernard gesprochenen Text, identifiziert die Phoneme und ermittelt für jedes einzelne den Klangfilter, der die Klangfarbe bestimmt.



Alle Phoneme werden mit dem zugehörigen Klangfilter abgespeichert.



Alice spricht den Text, der später mit der Stimme von Bernard ertönen soll. Dabei muss Alice Bernards Sprachmelodie nachahmen. Eine perfekte Imitation der Klangfarbe ist grundsätzlich nicht möglich.



In Alices Aufnahme werden sämtliche Phoneme identifiziert und analysiert. Bei der folgenden Rekonstruktion wird die Sprachmelodie beibehalten, jedoch der Klangfilter jedes Phonems durch den von Bernard ersetzt.



Der neu erzeugte Text erklingt mit der von Alice intonierten Sprachmelodie, aber mit der Klangfarbe von Bernard.

brüchige Stimme alter Menschen realistisch zu imitieren, bedarf es einer noch raffinierteren Bearbeitung. Im Alter leidet nämlich die mechanische Funktion des Sprachapparats: Die Stimmklappen schließen nicht mehr vollständig, dadurch nimmt der nicht schwingende Anteil des Luftstroms beim Sprechen zu und die Stabilität der Schwingungen ab, was sich als Brüchigkeit der Stimme äußert.

**Brüllen wie ein Löwe – in perfektem Französisch**  
Überraschenderweise ist es inzwischen sogar möglich, reine Fantasiestimmen zu erzeugen. Zum Beispiel spricht dann ein Mensch mit der Stimme eines Löwen. Diese Verwandlung beginnt mit der Aufzeichnung der menschlichen Stimme und des Löwengebrülls. Im nächsten Schritt ersetzt dann das (rechnerisch rekonstruierte) Klangsignal der Stimmklappen des Löwen das

des Menschen, es wird aber nach wie vor der Filter darauf angewandt, der dem menschlichen Vokaltrakt entspricht. Das Ergebnis ist verblüffend: Man hört eine klar verständliche menschliche Stimme mit dem Atem- und Brüllgeräusch des Löwen!

In der Welt des Kinos dienen diese digitalen Möglichkeiten dazu, die Stimmen von Schauspielern zu verändern oder imaginäre Wesen sprechen zu lassen. Der nächste Schritt besteht darin, Stimmen von verstorbenen Schauspielern oder historischen Persönlichkeiten zu reproduzieren. Am Ircam werden wir heute bereits häufiger gebeten, Stimmen auf der Basis von archivierten Aufzeichnungen wieder zum Leben zu erwecken.

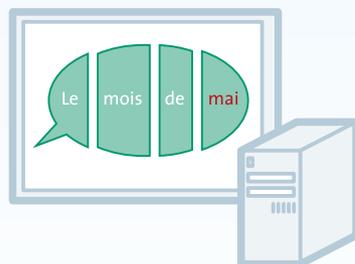
Die Sprachmelodie und die Klangfarbe machen die Identität einer Stimme aus. Aber welchen Beitrag liefern die beiden Merkmale zu einer Imitation? Wenn eine Per-

## Sprachsynthese

Systeme, die geschriebenen Text in gesprochenen verwandeln, gibt es schon länger; aber bisher wirkten die synthetischen Stimmen mechanisch und unnatürlich. Dank aktueller Fortschritte klingen sie heute natürlich und ausdrucksstark.



Alices Stimme wird über mehrere Stunden aufgenommen, während sie vorgegebene Texte spricht.



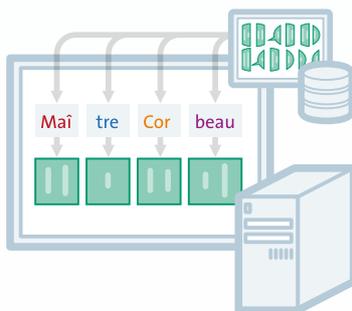
Ein Algorithmus unterteilt den gesprochenen Text in Phoneme, Silben und Wörter und analysiert die Sprachmelodie und die Klangfarbe.



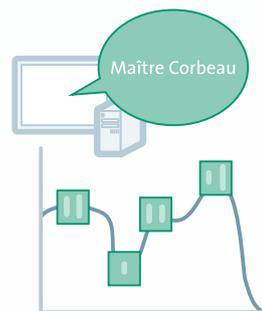
Je umfangreicher die Datenbank, desto natürlicher und ausdrucksvoller kann die neu geschaffene Stimme klingen.

Maître Corbeau,  
sur un arbre perché,  
Tenait en son bec  
un fromage.  
Maître Renard,  
par l'odeur alléché,  
Lui tint à peu près  
ce langage:

Der schriftliche Text (hier der Beginn einer Fabel von Jean de la Fontaine) wird analysiert und in eine Abfolge von Spracheinheiten wie Phoneme, Silben und Wörter unterteilt.



Unter mehreren Versionen einer Spracheinheit in Alices Stimmdatenbank wird diejenige ausgewählt, deren Klangfarbe und Sprachmelodie am besten zum Kontext des entsprechenden Satzes passen.



Ein Algorithmus glättet die Übergänge zwischen den Einheiten und verwischt damit die Unzulänglichkeiten der synthetischen Stimme.

son A (nennen wir sie »Alice«) versucht, die Stimme einer Person B (»Bernard«) nachzuahmen, verändert sie dabei hauptsächlich ihre Sprachmelodie. Die Klangfarbe einer fremden Stimme ist ungleich schwieriger nachzumachen: Alice kann sich ja nicht einfach Bernards Vokaltrakt zulegen. Selbst die begabtesten Imitatoren sind nicht in der Lage, die fremde Klangfarbe genau zu reproduzieren, und beschränken sich in der Regel auf die Imitation der Sprachmelodie.

Es kommt also entscheidend darauf an, auch die Klangfarbe zu transformieren. Dazu sammeln wir zunächst



ISTOCK / ADVENTR

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Sprachaufnahmen der zu imitierenden Person und legen sie in einer Datenbank ab. Die gesprochenen Sätze zerschneiden wir dann in Phoneme. Aus deren Analyse errechnen wir die akustische Signatur der Zielstimme. Genauer gesagt bestimmen wir für jedes einzelne Phonem eine Stimmmaske, das heißt einen akustischen Filter (vergleiche »Wie die Stimme geformt wird«, S. 52/53). Die Verwandlung von Alices Stimme in diejenige Bernards ist dann im Wesentlichen die Aktion, die in Textverarbeitungsprogrammen wie Word »Suchen/Ersetzen« heißt: Für jedes Phonem, das Alice mit ihrer Stimme erzeugt, sucht die Software in Bernards Stimmdatei eine passende Stimmmaske und setzt sie an die Stelle des Originals. Die so erzeugte Stimme hat dann auch die Klangfarbe der Zielperson (siehe »Stimmenverwandlung«, S. 54).

Diese Technologie hatte ihre Weltpremiere in mehreren Kinofilmen. Wir imitierten die Stimme von Marilyn Monroe in dem Film »Marilyn« von Philippe Parreno (2012), von Marshall Pétain in dem Dokumentarfilm »Juger Pétain« von Philippe Saada (2014) und von Louis de Funès in »Pourquoi j'ai pas mangé mon père« von Jamel Debbouze (2015).

Bei letzterem Film sprach ein Schauspieler in mehreren Sitzungen den Text der Filmfigur und imitierte dabei die Sprachmelodie des populären Komikers Louis de Funès (1914–1983). Parallel dazu wurde anhand historischer Aufnahmen eine Datenbank seiner Stimme erstellt, die etwa zehn Minuten Text umfasste. Die Forscher konnten dann die Klangfarbe des Schauspielers durch die stimmliche Signatur von Louis de Funès ersetzen. Das Ergebnis ist verblüffend: Es klingt, als hätte man den längst verstorbenen Mimen erst gestern aufgenommen, aber mit seiner Stimme aus den 1970er Jahren.

Die Forscher des Ircam sind bei dieser Errungenschaft nicht stehen geblieben. Inzwischen können wir nicht nur

einem bereits gesprochenen Text die Eigenschaften eines anderen Sprechers aufprägen, sondern einen beliebigen, nur schriftlich vorliegenden Text von einer synthetischen Stimme sprechen lassen (siehe »Sprachsynthese«, S. 55).

Die ersten Versuche, eine Stimme künstlich zu erzeugen, gab es im 18. Jahrhundert, dem Zeitalter der mechanischen Automaten und sprechenden Maschinen. Als die Elektrizität im 20. Jahrhundert Einzug hielt, wurden die Maschinen moderner und besser; ein Beispiel ist der VODER (Voice Operation Demonstrator) von 1939 aus den Bell Laboratories. Ein weiterer, 1962 ebendort mit dem IBM-Großrechner 704 entwickelter Stimmenerzeuger inspirierte die Stimme der künstlichen Intelligenz HAL im Film »2001: Odyssee im Weltraum« von Stanley Kubrick (1968).

Heute gibt es synthetische Stimmen als fertige Softwarepakete, und sie sind sogar personalisierbar. Man muss dazu nur aus mehreren Stunden Sprachaufzeichnung eine Stimmdatei erstellen. Denn im Gegensatz zur oben beschriebenen Stimmenverwandlung sind hier nicht nur einige Eigenschaften einer bereits existierenden Stimme zu verändern. Vielmehr muss man ein komplettes Sortiment von elementaren Bausteinen bereitstellen, aus dem man jeden beliebigen Text zusammensetzen kann. Nach diesem Prinzip funktionieren die meisten der heute verfügbaren Text-to-Speech-Programme (**Spektrum** Dezember 1996, S. 100).

Es gilt also, eine Art Puzzle zusammenzufügen. Jeder Stein ist ein Sprachartikel – ein Phonem, eine Silbe oder ein ganzes Wort – zusammen mit einer Sprachmelodie und einer Klangfarbe. Die Stimmdatei muss einen Vorrat an Puzzleteilen enthalten, der die klangliche Bandbreite und Variabilität der zu erschaffenden Stimme möglichst vollständig abdeckt. Und die Teile müssen aneinanderpassen. Deswegen gibt es zu jedem Sprachartikel viele Puzzlesteine zur Auswahl. Daraus eine geeignete Kombination zu finden, erfordert einen gewaltigen Aufwand.

Nicht zuletzt muss die Sprachmelodie als übergeordnete Struktur zum Text passen. Die Qualität der Stimmkonstruktion hängt von der Größe der Datenbasis ab: Nur wenn für jedes Sprachartikel möglichst viele individuelle Varianten verfügbar sind, gelingt eine natürlich wirkende Verbindung der Phoneme und eine reichhaltige Sprachmelodie. Punktuelle Retuschen, die Nahtstellen verschwinden lassen und Phrasierungen glätten, optimieren dann das Endergebnis.

### Mathematische Abstraktion:

#### Ein Phonem ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung

Seit Anfang der 2000er Jahre ist aus einer lediglich verständlichen eine natürlich und ausdrucksstark klingende Kunststimme geworden – inzwischen so perfekt, dass die Grenzen zu menschlichen Lautäußerungen verschwimmen. Im Rahmen der Ausstellung »La Voix« (»Die Stimme«) an der Cité des Sciences et de l'Industrie in Paris rekonstruierten wir 2014 die Stimme des Schauspielers André Dussolier. Am Ende konnte Dussolier seine eigene echte Stimme nicht von der nachgemachten unterscheiden.

Mittlerweile verfügen wir über Datenbanken mit tausenden unterschiedlicher Stimmen. Aus diesem Material können wir mit Hilfe des maschinellen Lernens Mischungen aus mehreren Stimmen erzeugen, sehr viele Stimmen zu einer »Durchschnittsstimme« zusammenrühren und dabei Sprachstil, Akzent oder Emotion modifizieren. Prinzipiell ähnelt das Verfahren der beschriebenen Stimmsynthese mit Puzzlesteinen, jedoch mit erheblichen Unterschieden. Zur Stimmsynthese dienen nämlich nicht mehr natürliche Stimmeelemente, sondern statistische Modelle der Stimme. Auf Basis dieser mathematischen Abstraktion lässt sich eine synthetische Stimme vollständig neu erzeugen. Ein Phonem ist jetzt nicht mehr eine Sammlung von Beispielen, sondern eine Wahrscheinlichkeitsverteilung (mit Mittelwert und Standardabweichung) in einem abstrakten vierdimensionalen Raum mit den Koordinaten Tonhöhe, Dauer, Intensität und Klangfarbe.

Den zeitlichen Verlauf des Sprechakts beschreiben wir durch so genannte Markow-Ketten. Wir unterstellen, dass das System – der gedachte Sprechapparat – zur Produktion eines Phonems nacheinander verschiedene Zustände annehmen muss. Wann ein Zustand in den Folgezustand übergeht, ist nicht präzise festgelegt, sondern wird wieder durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung beschrieben. Es sind auch nicht die Zustände direkt beobachtbar, sondern nur – mit gewissen Wahrscheinlichkeiten – deren akustische Auswirkungen: »hidden Markov models« in der Sprache der Statistiker. Eine echte menschliche Stimme wird nun nicht mehr vorrangig durch ein Sortiment von Puzzleteilen repräsentiert, sondern durch die (aus Tonaufnahmen ermittelten) Parameter der Markow-Modelle. Um zwei oder mehr echte Stimmen zusammenzumischen,

## Wem gehört das Imitat einer menschlichen Stimme? Dem Nachgemachten oder dem Nachmacher?

bildet man nicht Mittelwerte aus Phonemen, sondern aus den genannten Parametern. Und für die Parameter einer echten Stimme braucht man nicht mehr mehrere Stunden an Tonaufnahmen; es genügen ein paar Minuten.

Auf diesem Weg ist es bereits heute möglich, die Stimme einer Person, die ihre Sprechfähigkeit verloren hat, auf Basis von wenigen Minuten Tonmaterial zu rekonstruieren (siehe »Auf der Suche nach der verlorenen Sprache«, S. 58) oder einen Text, den ein Mensch in seiner Muttersprache spricht, quasi simultan mit derselben Stimme, aber in einer anderen Sprache wiederzugeben (siehe »Der Dolmetscher in der Westentasche«, rechts).

So eindrucksvoll diese Fortschritte auch sein mögen, noch sind die synthetischen Stimmen nicht perfekt, und für eine gute Qualität muss in jedem Einzelfall ein Mensch in den Prozess eingreifen. Doch die Revolution im Bereich der künstlichen Intelligenz, die enorme Lernfähigkeit »tiefer« neuronaler Netze (*Spektrum* September 2014, S. 62) und die massiven Datenmengen, die zur Verfügung ste-

## Der Dolmetscher in der Westentasche

Bei einer Japanreise möchten Sie sich mit einem Einheimischen verständigen. Sie nehmen Ihr Smartphone heraus, sprechen auf Deutsch in das Mikrofon, und praktisch gleichzeitig ertönt Ihre Stimme auf Japanisch aus dem Lautsprecher. Ihr Gesprächspartner antwortet in seiner Sprache, die Ihr Telefon sofort ins Deutsche übersetzt.

Dieses Szenario funktioniert heute schon mit Hilfe von Dolmetscherprogrammen, die erstmals 2009 im Rahmen des europäischen Projekts EMIME (Effective Multilingual Interaction in Mobile Environments, [www.emime.org](http://www.emime.org)) entstanden. Beteiligt waren IBM, Google und die Firma Mobile Technologies, die unter der Führung des Karlsruher Informatiker Alexander Waibel die Übersetzungssoftware Jibbiggo entwickelte und 2013 von Facebook aufgekauft wurde.

Automatisches Dolmetschen ist ein dreistufiger Prozess. Zunächst verwandelt ein Transkriptionsmodul die in das Mikrofon gesprochene Botschaft in schriftlichen Text. Den überträgt ein Übersetzungsmodul in die Zielsprache, und schließlich liest das Sprachsynthesemodul den übersetzten Text über den Lautsprecher des Smartphones vor.

Übersetzungsmodule arbeiten nicht mit Wörterbüchern und expliziten Grammatikregeln; vielmehr haben sie die Regeln aus einer Vielzahl von Textbeispielen erschlossen, die in beiden Sprachen vorliegen (*Spektrum* Juni 2013, S. 72). Für derartige Textpaare bieten amtliche Dokumente von mehrsprachigen Organisationen wie der Europäischen Union sowie ganz allgemein das Internet eine reichhaltige Quelle. Entsprechend sind die Regeln weniger starr als im Lehrbuch, sondern folgen dem tatsächlichen Sprachgebrauch.

Auch das Transkriptions- und das Sprachsynthesemodul haben ihre Fähigkeiten an Beispielen, insbesondere Audiobüchern, erlernt. Darüber hinaus lernt das Transkriptionsmodul während der Arbeit: Binnen weniger Sekunden passt es sich dem eigenwilligen Akzent des Gesprächspartners und dem Umgebungslärm an. Und das Sprachsynthesemodul hört seinem Benutzer zu und spricht mit dessen Stimme in der fremden Sprache. Wir werden also künftig Japanisch – oder jede andere Sprache – sprechen, ohne sie je gelernt zu haben.

Pierre Lanchantin  
Machine Intelligence Laboratory,  
University of Cambridge

## Auf der Suche nach der verlorenen Sprache

Manche neurodegenerativen Erkrankungen, seien sie altersbedingt oder genetischer Ursache, können das Sprechvermögen bis zur Unverständlichkeit reduzieren, obwohl die Patienten weder intellektuell noch kognitiv eingeschränkt sind.

Der Physiker Stephen Hawking beispielsweise leidet an der amyotrophen Lateralsklerose (ALS, auch Charcot-Krankheit), bei der motorische Neurone in der Großhirnrinde zu Grunde gehen. Er hat die Fähigkeit zu sprechen völlig verloren und kommuniziert mittels eines der ersten Sprachcomputer, der bereits in den 1970er Jahren entwickelt wurde. Der roboterhafte Klang von Hawkings Kunststimme wurde über die Jahre geradezu zum Markenzeichen des Physikers.

Mittlerweile ist es möglich, personalisierte Kunststimmen zu erzeugen, die wichtige Merkmale der stimmlichen Identität eines Patienten wie Klangfarbe, Betonung oder Akzent übernehmen. Diesen Stimmen liegt ein vereinfachtes Modell des natürlichen Sprechvorgangs zu Grunde. Dem-

nach ist der Klang der Sprache das Produkt der akustischen Anregung (Atemluft aus der Lunge versetzt die Stimmlippen in Vibration) und der Filterung im Vokaltrakt. Ein Algorithmus bestimmt die Parameter des Modells, etwa die Frequenzen der Stimmbandvibration oder die Resonanzcharakteristika des Vokaltrakts, für jedes einzelne Phonem in seinem jeweiligen linguistischen Zusammenhang. Grundlage dafür sind statistische Modelle, deren Parameter der Algorithmus anhand von Aufzeichnungen der natürlichen Stimme erlernt.

Dank außerordentlich leistungsfähiger lernender Algorithmen lassen sich personalisierte Sprachmodelle aus Aufzeichnungen von nur wenigen Minuten Dauer gewinnen. Dennoch denken viele Patienten nicht rechtzeitig daran, ihre eigene Stimme aufzunehmen, wenn sie sich im Rahmen ihrer Erkrankung zu verschlechtern beginnt. Es kommt dann darauf an, auf der Basis einer schon stark beeinträchtigten oder wenig verständlichen Stimme eine klare und

verständliche Kunststimme zu erschaffen. Forschern des CSTR (Centre for Speech Technology Research) an der University of Edinburgh (Schottland) ist es kürzlich gelungen, die Stimme eines Patienten zu rekonstruieren, indem sie bestimmte Eigenschaften der Stimme eines gesunden »Stimmspenders« in die Ersatzstimme integrierten. Dazu ersetzen sie defekte Komponenten im statistischen Modell der Patientenstimme durch die des Spenders.

Diese Methode ist in Zusammenarbeit mit der Anne Rowling Regenerative Neurology Clinic in Edinburgh inzwischen bei mehr als 50 Patienten zum Einsatz gekommen. Als Stimmspender dienen in erster Linie nahe Verwandten der Betroffenen (Geschwister oder Kinder). All diesen Patienten ermöglichte die personalisierte Kunststimme, ihre stimmliche Identität zu bewahren und mit ihren Mitmenschen besser zu kommunizieren.

Christophe Veaux  
Centre for Speech Technology Research,  
University of Edinburgh

hen, dürften eine weitere Welle von Fortschritten mit sich bringen. Wir hoffen, dass es in den nächsten Jahrzehnten gelingt, synthetische Stimmen zu erzeugen, die von natürlichen nicht mehr zu unterscheiden sind, jede beliebige Sprache sprechen und auf die jeweilige Person angepasst werden können.

Diese Fortschritte sind nicht unproblematisch. Sie werfen grundlegende Fragen zur Rolle künstlicher Stimmen und humanisierter Maschinen in unserer Gesellschaft auf.

Wem gehört eigentlich die synthetisch hergestellte Stimme, die nach dem Bilde einer echten erschaffen ist? Dem Nachgeahmten? Dem Nutznießer? Den Forschern und Ingenieuren, die das technisch realisiert haben? Wie lässt sich die nachgemachte Stimme von der echten unterscheiden? Wie kann ich sicher sein, dass es mein Freund ist, der mit mir telefoniert, wenn seine Stimme gefälscht sein kann?

Der japanische Robotikforscher Masahiro Mori hat schon 1970 in seinem Werk »The Uncanny Valley« davor gewarnt, einen Roboter allzu menschenähnlich zu machen,

da sonst die geringen verbleibenden Unterschiede Irritationen oder sogar Abscheu erregen würden. Dasselbe Problem könnte uns nicht nur mit dem Anblick, sondern auch mit den sprachlichen Äußerungen der Roboter bevorstehen. ◀

### QUELLEN

**Mullennix, J.W., Stern, S.E. (Hg.):** Computer Synthesized Speech Technologies: Tools for Aiding Impairment. IGI Publishing, Hershey (Pennsylvania) 2010

**Obin, N.:** MeLos: Analysis and Modeling of Speech Prosody and Speaking Style. Dissertation, Ircam-UPMC, 2011  
<https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-00694687v2/document>

**van den Oord, A. et al.:** WaveNet: A Generative Model for Raw Audio. In: Proceedings of Interspeech, San Francisco 2016  
<https://deepmind.com/blog/wavenet-generative-model-raw-audio/>

**Tokuda, K. et al.:** Speech Synthesis Based on Hidden Markov Models. In: IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing 101, S. 1234–1252, 2013

# 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



Universelle Gesetze: Zentraler Grenzwertsatz und Zufallsmatrizen • Rekorde: Sportliche Höchstleistungen und Hitzewellen • Fehlschlüsse: Missbrauch des p-Werts und mangelnde Reproduzierbarkeit • € 8,90 (erscheint am 25.8. 2017)



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



Georges Lemaître: Der Urheber der Urknall-Idee • Frühes Universum: Ließ das Higgs-Boson die Antimaterie verschwinden? • Konforme zyklische Astronomie: Urknall oder nicht? • Kaum Dunkle Materie in frühen Galaxien • € 5,90

**Hier bestellen:**

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

[www.spektrum.de/neuerscheinungen](http://www.spektrum.de/neuerscheinungen)

**Ausgewählte  
Sonderhefte  
auch im  
PDF-Format**



trisch leitend sowie in unterschiedlichen Körnungsgrößen im Chemikalienhandel erhältlich ist, lag es nahe, sie als Trägermaterial für diese Elektrode einzusetzen. Schwieriger gestaltete sich dann allerdings die Suche nach einem geeigneten, kostengünstigen Behälter dafür.

Es brauchte einige Recherchen, bis wir fündig wurden. Als geradezu ideal entpuppten sich schließlich so genannte Siebhülsen (handelsüblicher Name: Injektions-Ankerhülsen), die in Baumärkten in diversen Größen angeboten werden. Sie bestehen aus perforiertem Kunststoff und dienen eigentlich zur Befestigung massiver Bauelemente an Wänden. Mit Aktivkohle gefüllt, eignen sie sich jedoch auch als Sauerstoff-Elektroden.

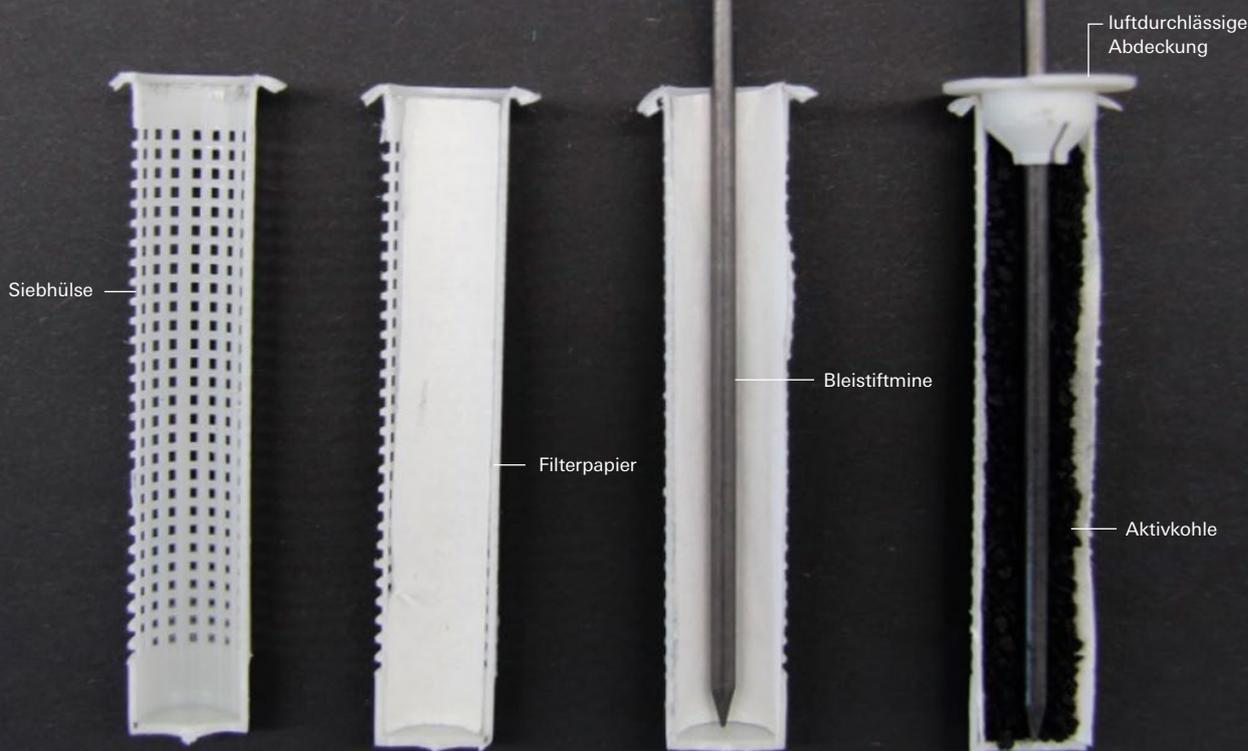
Um zu verhindern, dass die Aktivkohlekörner durch die Löcher in der Kunststoffhülse rutschen, müssen Sie deren Innenwand zunächst mit einem passend zurechtgeschnittenen Filterpapier auskleiden. Wickeln Sie es dazu um einen Stift und führen Sie es mit dessen Hilfe ein.

Anschließend stellen Sie eine Bleistiftmine als Ableit-elektrode mittig in die Siebhülse. Halten Sie die Mine mit Daumen und Zeigefinger fest, während Sie als Nächstes die gekörnte Aktivkohle einfüllen. Um eine möglichst dichte Packung zu erreichen, sollten Sie mit der Siebhülse mehrmals vorsichtig gegen die Tischkante klopfen, so dass sich ihr Inhalt setzt. Das frei werdende Volumen füllen Sie jeweils wieder mit Kohle. Eine ausführliche Anleitung zum Bau der Sauerstoff-Elektrode finden Sie in einer Ergänzung zu diesem Artikel im Internet unter [www.spektrum.de/artikel/1485135](http://www.spektrum.de/artikel/1485135). Dort stehen auch weiterführende theoretische Betrachtungen zum Thema Metall-Luft-Batterien.

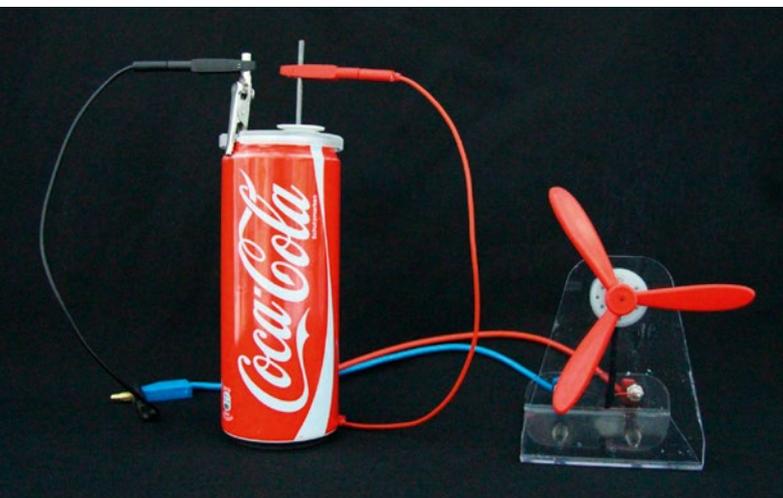
### Die Cola-Dosen-Batterie

Mit unserer Sauerstoff-Elektrode und einer gewöhnlichen Cola-Dose können Sie nun ganz einfach eine erstaunlich leistungsfähige Metall-Luft-Batterie anfertigen. Entfernen Sie dazu mit einem Metall-Cutter vorsichtig den Deckel der

Diese Querschnittsaufnahmen zeigen die einzelnen Schritte zur Herstellung einer Sauerstoff-Kohleelektrode, die als Kathode einer Metall-Luft-Batterie dient. Eine Siebhülse wird mit Filterpapier ausgekleidet und mit Aktivkohle gefüllt, nachdem eine Bleistiftmine mittig hineingestellt worden ist. Zum Schluss kann man eine zur Siebhülse gehörende luftdurchlässige Abdeckung aufstecken, damit beim Handhaben der Elektrode keine Kohle herausfällt.



MARCO OETIKEN



MARCO BREYER

**Führen Sie einfach die Sauerstoff-Kohleelektrode in eine Cola-Dose ein, die mit Kochsalzlösung gefüllt ist. Schon haben Sie eine Batterie, die beispielsweise einen Elektromotor mit Propeller antreiben kann.**

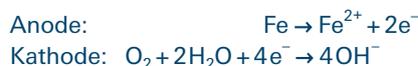
Dose. Damit Sie sich später nicht an dem scharfkantigen Rand schneiden, sollten Sie ihn mit einer Feile glätten und abstumpfen. Als Nächstes müssen Sie mit Schmirgelpapier, das Sie um einen Holzstab gewickelt haben, die Oberfläche im Innern aufrauen.

Füllen Sie die Dose nun fast bis zum Rand mit zehnprozentiger Kochsalzlösung (100 Gramm auf einen Liter Wasser). Setzen Sie einen passenden Kunststoffdeckel darauf, in den Sie ein ausreichend großes Loch gestanzt haben, so dass die Sauerstoff-Kohleelektrode hindurchpasst. Außerdem sollten Sie eine seitliche Ausparung vorsehen, damit sich am Dosenrand eine Krokodilklemme als Ableitelektrode befestigen lässt. Die Cola-Dose fungiert nämlich gleichzeitig als Anode und als Elektrolytgefäß. Die Kohleelektrode, die Sie in das Loch im Deckel hängen, bildet dagegen die Kathode.

Verbinden Sie die beiden Elektroden schließlich über Kabel mit einem Elektrogerät, das sich mit Gleichstrom geringer Spannung betreiben lässt – beispielsweise mit dem übers Internet leicht erhältlichen Solarmotor RF300, der zum Miniaturventilator wird, wenn Sie einen kleinen Propeller aufstecken (Bild oben). Für Messungen können Sie, sofern Sie darüber verfügen, außerdem ein Amperemeter zwischen- und ein Voltmeter parallel schalten. Diese recht originelle Batterie besitzt zu Beginn eine Gesamtspannung von 0,68 Volt. Sobald Sie den Stromkreis schließen, beginnt sich der Propeller zu drehen.

Die Batterie funktioniert, weil die Wand der Cola-Dose aus Weißblech besteht. Dabei handelt es sich um Eisen (Fe), das zum Korrosionsschutz mit einer dünnen Schicht Zinn überzogen ist. Diesen Überzug haben Sie beim Aufrauen mit Schmirgelpapier teilweise abgekratzt. Das so freigelegte Eisen bildet zusammen mit der Sauerstoff-Kohleelektrode und der Kochsalzlösung als Elektrolyt nun ein galvanisches Element. Dabei löst sich das Metall langsam unter Freisetzung von Eisen-Ionen und Elektro-

nen auf. Letztere fließen über den angeschlossenen Elektromotor zur Kohleelektrode, wo der anhaftende Sauerstoff sowie teilweise auch im Elektrolyten gelöste Sauerstoff zu Hydroxid-Ionen umgesetzt wird. Die entsprechenden Gleichungen lauten:



Die Sauerstoff-Kohleelektrode hat dank der enthaltenen hochporösen Aktivkohle eine extrem große innere Oberfläche von bis zu 2000 Quadratmetern pro Gramm. Diese dient als aktive Grenzfläche, an welcher der Sauerstoff unter Aufnahme von Elektronen mit dem Wasser reagiert. Deshalb spielt sie für die Kapazität und damit Leistung der Metall-Luft-Batterie eine wichtige Rolle: Je größer sie ist, desto schneller und leichter kann die Reaktion ablaufen. Da das Oxidationsmittel Sauerstoff quasi unbegrenzt in der Luft vorhanden ist und der Kathode durch ständiges Nachdiffundieren jederzeit zur Verfügung steht, sollte die Lebensdauer der Batterie nur durch die Menge an Eisen in der Kathode begrenzt sein – zumindest in der Theorie.

Die Praxis sieht allerdings leider anders aus: Lange bevor sich die Wand der Cola-Dose aufgelöst hatte oder auch nur merklich dünner geworden war, fiel bei unseren Versuchen die Spannung der Batterie ab, und der Propeller drehte sich immer langsamer, bevor er nach nicht einmal zwei Stunden ganz stehen blieb. Der Grund war offenbar ein Mangel an Sauerstoff an der Kathode, weil das Gas schneller verbraucht wurde, als Nachschub aus der Luft durch die Poren der Aktivkohle drang. Demnach leidet unsere einfache Metall-Luft-Batterie unter demselben Problem, mit dem derzeit Wissenschaftler weltweit ringen: Die Diffusion des Sauerstoffs aus der Luft durch das Kathodenmaterial bis an die Grenze zum Elektrolyten ist extrem langsam.

Wir unternahmen verschiedene Versuche, den Zutritt des Gases zu erleichtern. Doch selbst die Elektrode damit zu umspülen, half nicht. Anscheinend wird während der anfänglichen zwei Betriebsstunden praktisch nur der Sauerstoff verbraucht, der bereits an der Aktivkohle adsorbiert ist. Es dauert offenbar äußerst lange, bis neues Gas den Weg tief in die Poren findet. Diese Diffusion zu beschleunigen, ist ein vertracktes Problem, und die Lösung wird sicher nicht leicht zu finden sein. Aber die Suche nach ihr lohnt – würde sie doch die Tür zum ersehnten Zeitalter der Elektromobilität weit aufstoßen. ◀

#### QUELLEN

**Klaus, M. et al.:** Metall-Luft-Batterien mit einer neuartigen Kohleelektrode. In: CHEMKON 21, S. 65–71, 2014

**Linden, D., Reddy, T. B.:** Linden's Handbook of Batteries. Mcgraw-Hill Education, New York 2011

**Oetken, M. et al.:** Die Passivität der Metalle. In: Praxis der Naturwissenschaften – Chemie 45, S. 15–20, 1996

**Wei, Z. D. et al.:** Carbon-Based Air Electrodes Carrying MnO<sub>2</sub> in Zinc-Air Batteries. In: Journal of Power Sources 91, S. 83–85, 2000

# KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ!

€ 4,99  
je Ausgabe



Bestellmöglichkeit und weitere Ausgaben:

[www.spektrum.de/kompakt](http://www.spektrum.de/kompakt)

# EXOPLANETEN BLICK IN DIE ATMOSPHÄREN FREMDER WELTEN

**Das James Webb Space Telescope wurde ursprünglich entwickelt, um weit entfernte Galaxien zu beobachten. Nun soll das 2018 startende Instrument bahnbrechende Erkenntnisse über Exoplaneten in unserer unmittelbaren kosmischen Nachbarschaft liefern – und vielleicht sogar den Nachweis, dass dort Leben gedeiht.**



**Kevin Heng** ist Professor für Astronomie und Planetenwissenschaft an der Universität Bern und Gastprofessor an der Johns Hopkins University. Der Autor des Buchs »Exoplanetary Atmospheres: Theoretical Concepts and Foundations« ist auch Mitglied des wissenschaftlichen Kernteams der CHEOPS-Mission, die unter Schweizer Führung nach erdähnlichen Exoplaneten suchen soll.

► [spektrum.de/artikel/1485137](http://spektrum.de/artikel/1485137)

► Nach seinem Start im Oktober 2018 wird das James Webb Space Telescope (JWST) viele aufregende Beobachtungsmöglichkeiten bieten. An die vielleicht aufregendste hat aber bei den ersten Entwürfen des Teleskops noch niemand gedacht: die Jagd nach Planeten fremder Sterne, auf denen es Leben geben könnte. Als man Anfang der 1990er Jahre mit den Planungen für einen Nachfolger der Weltraumteleskope Hubble und Spitzer begann, wirkte diese Vorstellung geradezu aberwitzig. Denn damals gingen die meisten Wissenschaftler noch

davon aus, dass es keine Planeten außerhalb des Sonnensystems gibt.

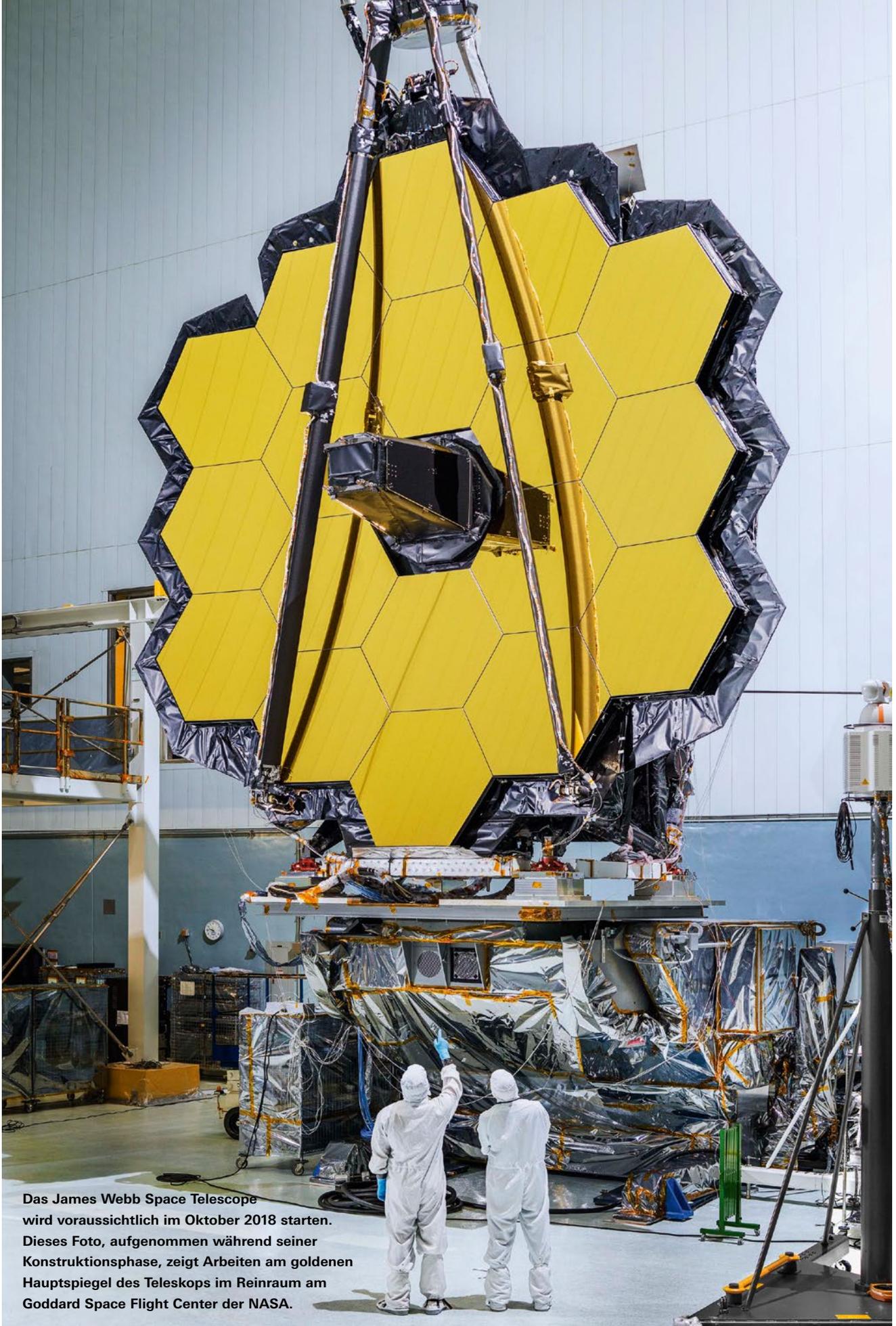
Also entwarf man ein Teleskop, das die ersten Sterne und Galaxien im Kosmos beobachten kann. Da das Universum expandiert, ist die Strahlung weit entfernter Objekte stark rotverschoben. Deshalb musste das neue Instrument im infraroten Bereich des Lichtspektrums arbeiten. Heute, im Jahr 2017, ist die Situation ganz anders als gedacht: Mittlerweile sind tausende Exoplaneten bekannt. Und sofern es sich um Gasplaneten handelt, ist die Untersuchung ihrer Atmosphären für Astrophysiker fast schon Routine geworden.

Diese Entwicklung hat auch die Rolle des teuersten Teleskops der Menschheit verändert. Plötzlich ist das JWST ein wichtiges Instrument für die Erforschung fremder Welten: Mit etwas Glück werden Forscher dank seiner Hilfe nachweisen, dass auf der Oberfläche mancher Exoplaneten lebensfreundliche Bedingungen herrschen.

Die Untersuchung der Atmosphären weit entfernter Planeten ist eine noch junge Wissenschaft. 2005 wies das Weltraumteleskop Spitzer erstmals Strahlung aus der Gashülle eines Exoplaneten nach, der einem stark aufgeheizten Verwandten des Jupiters ähnelt. In den darauf folgenden Jahren lernten Astrophysiker, Strahlungssignale aus vergleichbaren Atmosphären genau auszuwerten, so dass sie vielerorts chemische Elemente und Verbindungen nachweisen konnten. Bislang ist dies mit Wasser, Kohlenmonoxid, Wasserstoff, Magnesium, Methan, Natrium und Kalium gelungen.

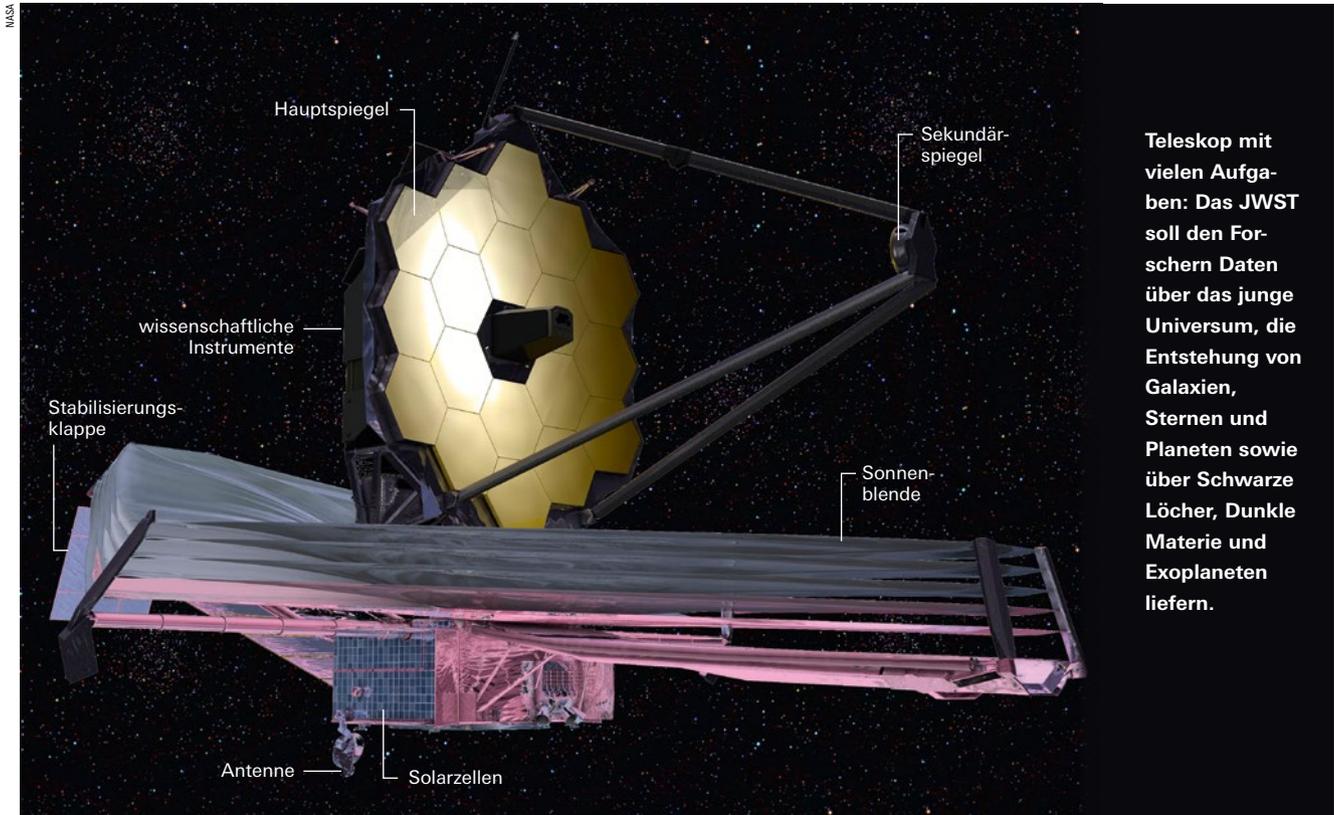
## AUF EINEN BLICK FLAGGSCHIFF DER ASTRONOMEN

- 1** Das James Webb Space Telescope (JWST) wird mit 6,5 Meter Spiegeldurchmesser das bisher größte Weltraumteleskop. Es soll im Oktober 2018 starten.
- 2** Im Infrarotspektrum wollen Wissenschaftler die Atmosphären von Exoplaneten untersuchen und darin vielleicht Biomarker wie Sauerstoff und Wasser nachweisen.
- 3** Allerdings wird das JWST wenn überhaupt nur wenige erdähnliche Welten ins Visier nehmen können – ihre Beobachtung ist eine große technische Herausforderung.



Das James Webb Space Telescope wird voraussichtlich im Oktober 2018 starten. Dieses Foto, aufgenommen während seiner Konstruktionsphase, zeigt Arbeiten am goldenen Hauptspiegel des Teleskops im Reinraum am Goddard Space Flight Center der NASA.

NASA / CHRIS GUINN



**Teleskop mit vielen Aufgaben:** Das JWST soll den Forschern Daten über das junge Universum, die Entstehung von Galaxien, Sternen und Planeten sowie über Schwarze Löcher, Dunkle Materie und Exoplaneten liefern.

Heutzutage kommt für solche Messungen routinemäßig das Weltraumteleskop Hubble mit seinem 2,4 Meter großen Hauptspiegel zum Einsatz. Mit ihm haben Forscher bereits viel über die ungefähren klimatischen Bedingungen auf weit entfernten Welten gelernt. Und dank Fortschritten in der Beobachtungstechnik rücken jetzt zunehmend auch die Atmosphären kühlerer und kleinerer Planeten in ihr Visier.

Diese Entwicklung hat noch während der Vorbereitungen zu Änderungen am JWST geführt – sowohl mit Blick auf die Hardware als auch auf den geplanten Betrieb. Da die Lebensdauer des Weltraumteleskops möglicherweise nur fünfeneinhalb Jahre betragen wird, konzentrieren sich die Astronomen auf die am besten geeigneten Ziele für die Erforschung der Atmosphären von Exoplaneten: Zuerst kommen Gas- und Eisriesen an die Reihe. Und dann folgt eine Auswahl kleinerer Planeten.

### **Gas- und Eisriesen sollen zu den bevorzugten Zielen des James Webb Space Telescope gehören**

Die Weltraumteleskope Hubble und Spitzer haben bereits gezeigt, wie wertvoll Beobachtungen aus dem All für die Erforschung von Exoplaneten sind. Das JWST wird beide Instrumente übertreffen, indem es ihre Fähigkeiten übernimmt und ausbaut. Sein Spiegel ist mit einem Durchmesser von 6,5 Metern deutlich größer und sammelt daher mehr Licht in kürzerer Zeit. Somit können die Astronomen leuchtschwächere Objekte untersuchen. Auch die Empfindlichkeit und der abgedeckte Wellenlängenbereich sind größer als bei den Vorgängern. Das JWST wird dabei in der Tradition der großen Observatorien der NASA stehen und von Astronomen aus aller Welt genutzt werden.

Um mit ihm etwas über fremde Welten zu lernen, muss man einen Stern beobachten, an dem gerade ein Planet vorüberzieht. Bei solch einem Transit schwankt die Helligkeit des Sterns geringfügig. So kann man einerseits Planeten nachweisen, wie die Tausende von Entdeckungen des Weltraumteleskops Kepler zeigen. Messen die Astronomen bei einem Transit die Größe des Planeten bei verschiedenen Wellenlängen, können sie zudem ein Spektrum seiner Atmosphäre erhalten, das Informationen über deren Zusammensetzung liefert.

Mit dieser Messtechnik lässt sich beispielsweise Wasser nachweisen: Enthält eine Atmosphäre viel Wasserdampf, so erscheint der Planet etwas größer, wenn man ihn bei einer Wellenlänge beobachtet, die von  $H_2O$ -Molekülen absorbiert wird. Nach demselben Prinzip kann man auch andere Stoffe und Verbindungen nachweisen, die oft jeweils einige charakteristische Wellenlängen aus dem Spektrum schlucken.

Große Planeten, die ihren Stern auf relativ engen Bahnen umkreisen, lassen sich mit dieser Methode leichter studieren als kleine Welten. Deshalb werden Gas- und Eisriesen von der Größe Neptuns bis zu solchen, die noch größer als Jupiter sind, zu den bevorzugten Zielen des JWST gehören. Insgesamt kann das Teleskop die Atmosphären von mehreren hundert Gas- und Eisriesen untersuchen, schätzen Astronomen. Indem sie untersuchen, welche Stoffe in den Lufthüllen vorhanden sind, lassen sich vielleicht statistische Trends ausmachen, die zu neuen Erkenntnissen über die Entstehung von Atmosphären führen.

Die Beobachtung von erdähnlichen Exoplaneten ist leider nicht so einfach. Da sie kleiner sind, halten sie bei

einem Transit weniger Sternenlicht zurück. Hinzu kommt noch ein anderes Problem: Wenn die Planeten unseres Sonnensystems typisch sind, dann sind die Atmosphären kleinerer Exoplaneten eher sekundärer als primärer Natur. Primäre Atmosphären bestehen aus übrig gebliebenen Gasen der protostellaren Wolke, aus der ein Stern und seine Planeten entstanden sind, und enthalten daher hauptsächlich Wasserstoff. In unserem Sonnensystem besitzen Jupiter und Saturn primäre Atmosphären, die in ihrer chemischen Zusammensetzung unserer Sonne ähneln.

Sekundäre Atmosphären haben ihren Ursprung in der Geologie oder Biologie eines Planeten. Ihre chemischen Zusammensetzungen unterscheiden sich deutlich von jenen der jeweiligen Zentralsterne. Die Atmosphäre der Erde besteht überwiegend aus Stickstoff, die Atmosphären von Mars und Venus dagegen hauptsächlich aus Kohlendioxid. Ganz allgemein erwarten wir, dass sekundäre Atmosphären aus schwereren Elementen bestehen. Dann sind sie aber auch kompakter und entsprechend schwieriger zu entdecken. Kühlere Lufthüllen wie die der Erde weisen außerdem vermutlich Wolken auf. Das macht die Sache noch kniffliger, da wegen ihnen nochmals weniger Licht aus der Atmosphäre einen Beobachter erreicht.

Insgesamt wird man für die Untersuchung der Atmosphären von Planeten mit einer Größe zwischen Erde und Neptun also sehr viel mehr Beobachtungszeit benötigen als für Gasriesen. Deshalb können wir vermutlich nur etwa ein Dutzend solcher mittelgroßer Exoplaneten mit dem JWST anvisieren. Die Chancen, damit auch für deren Atmosphären statistische Trends zu ermitteln, stehen nicht gut. Immerhin wären die Messungen ein wichtiger Orien-

tierungsrahmen für künftige Messkampagnen. Schließlich gibt es in unserem Sonnensystem weder Supererden noch Minineptune – deshalb ist jede neue Erkenntnis über ihre Atmosphären von großer Bedeutung.

### Zweite Erde im Visier

Noch schwieriger wird es sein, mit dem JWST erdähnliche Planeten zu untersuchen. Als »erdähnlich« bezeichnen Astronomen einen Exoplaneten, wenn er ungefähr die gleiche Größe und die gleiche Masse besitzt wie unsere Heimat. Außerdem sollte er seinen Zentralstern in einem Abstand umkreisen, der flüssiges Wasser auf seiner Oberfläche ermöglicht. Die Beobachtungszeit am JWST wird aber hart umkämpft sein, zumal Wissenschaftler auch andere Dinge als Exoplaneten beobachten wollen. Daher wird man wohl bloß eine Hand voll solcher Welten anvisieren können. Da ihre Transitsignale vermutlich sehr schwach sind, würden Astronomen dabei solche Planeten bevorzugen, die um einen nahen und hellen Stern kreisen – in diesem Fall ist es einfacher, die Lichtabschwächung während eines Transits zu messen. Ein Stern darf jedoch auch nicht zu hell sein, denn dann fällt zu viel Licht auf die empfindlichen Instrumente des JWST.

Aber welche Welten kommen hier in Frage? Der 2016 entdeckte Exoplanet Proxima Centauri b, der sich mit einer Entfernung von etwa vier Lichtjahren praktisch in unserer unmittelbaren kosmischen Nachbarschaft befindet, wäre ein interessanter Kandidat. Allerdings scheint er von der Erde aus gesehen nicht vor seinem Stern vorüberzuziehen. Deshalb wissen wir auch nicht, wie groß dieser Exoplanet ist. Mehrere Weltraummissionen sollen in den kommenden Jahren Kandidaten aufspüren, die geeigneter sind. Die Teleskope heißen CHEOPS (CHaracterizing ExOPlanet



Satellites), TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) und PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars). TESS soll nach seinem Start im Jahr 2018 den gesamten Himmel nach kleinen Exoplaneten absuchen, die von der Erde aus gesehen ihren hellen Zentralstern passieren. Auch CHEOPS soll 2018 starten, sich aber jeweils auf einzelne Sterne fokussieren und dort nach Transits suchen. Der Start von PLATO ist derzeit für 2026 geplant, womit das Weltraumteleskop vermutlich zu spät kommt, um die Nutzung des JWST zu beeinflussen. Das ist bedauerlich, spezialisiert sich PLATO doch auf die Suche nach erdähnlichen Planeten, die sonnenähnliche Sterne umkreisen.

Sollten Astronomen tatsächlich irgendwann solch einen Zwilling der Erde im Orbit eines hellen Sterns aufspüren, würde die Untersuchung seiner Atmosphäre für das JWST allerdings eine Herausforderung. Denn um ein aussagekräftiges Spektrum zu erhalten, müssen die Forscher nicht nur einen, sondern viele Transits beobachten – und zwei von ihnen liegen entsprechend den Umlaufzeiten dieser Planeten jeweils etwa ein Jahr auseinander.

Eine andere Strategie ist der Bau erdgebundener Teleskope, die auf die Suche nach kleinen Exoplaneten spezialisiert sind. In den vergangenen Jahren haben eine ganze Reihe solcher Instrumente den Betrieb aufgenommen. So sucht das unter belgischer Leitung stehende TRAPPIST (TRANsiting Planets and Planetesimals Small Telescope) nach Transitplaneten bei sehr kühlen Roten Zwergen, die viel kleiner sind als unsere Sonne. Da die Stärke eines Transitsignals vom Verhältnis der Größe des Exoplaneten zu der seines Sterns abhängt, fallen vorüberziehende Exoplaneten hier besonders auf.

Schon die erste Entdeckung von TRAPPIST war eine Sensation: Zwar besitzt der Stern TRAPPIST-1 nur ein

Projekt SAINT-Ex will künftig mit einem ähnlichen Teleskop wie TRAPPIST auf der Nordhalbkugel nach vergleichbaren Systemen suchen. Es bleibt abzuwarten, wie viele solcher kleiner Exoplaneten bei roten Zwergsternen letztlich als Ziele des JWST in Frage kommen.

### **Erdähnliche Exoplaneten bringen die Instrumente an ihre Grenzen**

Um mit dem JWST aufregende Entdeckungen machen zu können, müssen die Astronomen das Maximum aus dem Weltraumteleskop herausholen. Es ist mit vier wissenschaftlichen Instrumenten ausgestattet: dem Nahinfrarot-Spektrografen NIRSpec, dem Nahinfrarot-Bildwandler und spaltlosen Spektrografen NIRISS, der Nahinfrarot-Kamera NIR-Cam und MIRI, einem Instrument für mittlere Infrarotwellenlängen. Gemeinsam analysieren sie den Wellenlängenbereich von 0,6 bis 28 Mikrometern und vereinen damit die Kapazitäten von Hubble und Spitzer.

Mit den Instrumenten können Astronomen sowohl Fotos als auch Spektren von astronomischen Objekten aufnehmen. Jedes Instrument lässt sich auf unterschiedliche Weise nutzen, je nachdem, ob die Forscher bei einer Beobachtung eine hohe spektrale Auflösung oder einen hohen Abstand zwischen Signal und Rauschen wünschen. Diese beiden Aspekte sind eng verknüpft – je feiner die Aufspaltung nach Wellenlängen, desto schwieriger ist es, ein Signal bei einer spezifischen Frequenz nachzuweisen.

Weiterhin müssen die Astronomen alle Besonderheiten des Teleskops und seiner Instrumente kennen, die Wissenschaftler sprechen von systematischen Effekten. Will man ein sehr schwaches Signal entdecken, so muss man zunächst alle Ursachen von Rauschen und Störungen ausfindig machen. Die Pixel eines Detektors besitzen möglicherweise nicht alle exakt dieselbe Empfindlichkeit – und sogar innerhalb eines Pixels kann diese variieren.

Es ist auch praktisch unmöglich, ein Teleskop exakt auf ein Objekt auszurichten und vollkommen still zu halten. Immer wird es irgendeine Art von Bildinstabilität geben, die das eigentliche Signal verrauscht. Daneben führen Bewegungen sekundärer Komponenten des Teleskops, etwa der Antenne, zu kleinen, aber messbaren Störungen des Signals. Ein Problem sind auch Temperaturunterschiede, da sie das Teleskop deformieren und damit beschädigen können.

All das kennen Forscher schon von anderen Weltraumteleskopen. Hubble verformt sich beispielsweise alle 30 Minuten ein wenig, wenn es aus dem oder in den Schatten der Erde tritt. Wie die Astronomin Laura Kreidberg vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics berichtet, beeinflusst dieser Effekt die Genauigkeit der Nahinfrarot-Detektoren. Bei Spitzer wiederum führten Variationen der Empfindlichkeit innerhalb der Pixel dazu, dass die ersten Untersuchungen der Atmosphären von Exoplaneten zunächst keine schlüssigen Ergebnisse lieferten.

Es hat letztlich ein Jahrzehnt gedauert, diese Schwankungen zuverlässig auszugleichen. Da das JWST Detektoren verwendet, die auf das Erbe von Hubble und Spitzer zurückgehen, werden die dort gesammelten Erfahrungen von großem Wert sein, wenn die ersten Daten einlaufen. Auch hat es im Vergleich zu Hubble eine günstigere Um-



### **Mehr Wissen auf Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/exoplaneten](http://spektrum.de/t/exoplaneten)

ISTOCK / SDECORET

Zehntel der Masse unserer Sonne, aber dennoch umkreisen ihn sieben erdgroße Planeten. Und obwohl alle Planeten des Systems ihrem Stern näher sind als der Merkur der Sonne, ist auf drei von ihnen flüssiges Wasser denkbar. Die engen Umlaufbahnen bieten einen weiteren Vorteil: Die Transits folgen schnell aufeinander, es lassen sich also in kürzerer Zeit ausreichend Daten für ein umfassendes Spektrum sammeln.

Das Sternsystem TRAPPIST-1 hat eine der Hauptkenntnisse der Kepler-Mission bestätigt: Gesteinsplaneten scheinen im Weltall alles andere als die Ausnahme zu sein, und wenn es in einem System einen solchen Planeten gibt, stehen die Chancen nicht schlecht, dass dort weitere existieren. Das unter schweizerischer Leitung stehende

laufbahn: Das JWST wird am Lagrange-Punkt L2 um die Sonne kreisen, während sich Hubble im Erdorbit befindet. Im Vergleich zu Spitzer haben die Forscher hingegen die Stabilität der Ausrichtung des Teleskops verbessert.

Die Astronomen des Space Telescope Science Institute, das den Betrieb sowohl des Hubble Space Telescope als auch des JWST leitet, initiierten unlängst ein »Early Release Science«-Programm – ein spezielles Programm also für Beobachtungsprojekte, bei denen die einlaufenden Daten sofort öffentlich zugänglich gemacht werden. Eines der vorgeschlagenen Projekte soll einen Exoplaneten mit vielen Transits finden, den das JWST permanent beobachten könnte. Dazu muss der Mutterstern des Planeten weit ober- oder unterhalb der Bahnebene der Planeten in unserem Sonnensystem liegen.

Bislang ist der heiße Jupiter WASP-62b das beste Beispiel für einen solchen Exoplaneten. Beobachtungen dieses Objekts mit den vier Instrumenten des JWST in unterschiedlichen Konfigurationen könnten den Forschern wichtige Informationen über die Eigenschaften der Instrumente liefern sowie darüber, wie sie sich optimal für die Transit-Spektroskopie einsetzen lassen. Bereits jetzt bereiten die Astronomen also die ersten Beobachtungen der Atmosphären von Exoplaneten vor.

### Blick in Exo-Atmosphären

Sobald die Wissenschaftler das infrarote Spektrum vom Rauschen getrennt haben, stehen sie vor dem Problem, es korrekt zu interpretieren. Ein Spektrum besteht – als Diagramm der Intensität dargestellt – aus einer Reihe von Bergen und Tälern unterschiedlicher Formen und Größen. Diese Strukturen können wir interpretieren, weil wir annehmen, dass die Gesetze der Physik und der Chemie im ganzen Universum gleich sind: Das Spektrum von Wassermolekülen sieht in einem irdischen Labor genauso aus wie in der Atmosphäre eines fernen Planeten. Dennoch ist es schwierig, eindeutige Schlüsse zu ziehen, denn Atmosphären bilden ein sehr komplexes System, das von vielen Faktoren beeinflusst wird, etwa von Druck, Dichte und Temperatur, die sich mit der Höhe über der Oberfläche verändern. Gelingt es letztlich, aus der nach außen dringenden Strahlung das Spektrum zu rekonstruieren, müssen Astrophysiker noch daraus ableiten, welche Atome und Moleküle in der Atmosphäre existieren und wie häufig sie relativ zueinander vorkommen.

Wissenschaftler stützen sich hierfür auf Erkenntnisse aus der Atmosphären- und Klimaforschung. Die ersten Versuche sind durchaus ermutigend. Beispielsweise wissen wir inzwischen, dass die Gashüllen heißer Jupiter Wasser enthalten können und dass manche von ihnen wolkenverhangen sind. Ein Exemplar sieht im reflektierten Licht seines Zentralsterns sogar bläulich aus. Außerdem sind Wissenschaftler mittlerweile in der Lage, Temperaturkarten der Tag- und Nachtseiten der riesigen Exoplaneten anzufertigen.

Mit der stetigen Weiterentwicklung der Methoden erwarten wir, schon bald Spektren kühlerer und kleinerer Welten zu erhalten. Letztlich hoffen wir, die Verfahren irgendwann auf die Atmosphäre eines erdähnlichen Plane-

NASA/JPL-CALTECH/IR. HURT/PIRCI



ten anwenden zu können und so zu erkennen, aus welchen Gasen sie besteht. Mit dieser Information könnte man schließlich Rückschlüsse darauf ziehen, ob es dort Leben gibt. Wenn wir Glück haben, kann uns das JWST innerhalb eines Jahrzehnts chemische Indizien für die Existenz von Leben auf einem Exoplaneten liefern. Die große Herausforderung wird aber sein, nicht nur Signale zu finden, die auf Leben hinweisen, sondern auch solche, die dessen Existenz eindeutig beweisen.

### Der Nachfolger des JWST wird für Exoplaneten-Beobachtungen optimiert

Inzwischen entwickelt die NASA bereits Pläne für einen Nachfolger des JWST. Seine vorläufige Bezeichnung lautet »Large Ultraviolet/Optical/Infrared Surveyor«, auf Deutsch etwa: großes Vermessungsinstrument für den ultravioletten, optischen und infraroten Bereich, abgekürzt LUVVOIR. Wie seine Vorgänger wird auch dieses Teleskop im Lauf seiner Entwicklung einen einprägsameren Namen erhalten. Mit seinem 8 bis 16 Meter großen Primärspiegel soll es die Fähigkeiten von Hubble, Spitzer und JWST in sich vereinen und Spektren durchgehend vom infraroten bis zum ultravioletten Bereich messen.

Irgendwann in den 2030er Jahren könnte LUVVOIR starten. Es wird von Anfang an unter Berücksichtigung der Exoplanetenforschung entwickelt. Denn in nicht allzu ferner Zukunft wird es Alltag sein, Spektren von Exoplaneten zu untersuchen, aus ihnen auf die Existenz von Kontinenten und Ozeanen zu schließen – und Moleküle nachzuweisen, die uns Hinweise auf Leben liefern. ◀

### LITERATURTIPPS

**Heng, K., Winn, J.:** Auf der Jagd nach der zweiten Erde. In: Spektrum der Wissenschaft 4/2016, S. 36–44  
*Mehr Informationen über andere Exoplaneten-Teleskope*

**Kaltenegger, L.:** Faszinierende neue Welten. In: Spektrum der Wissenschaft 7/2013, S. 58–67  
*Weitere Details zur Spurensuche im All*

# SCHLICHTING! VERNEBELTE DURCHSICHTEN



**Licht streuende Partikel zwischen einem Gegenstand und dessen Betrachter trüben den Anblick. Dabei kommt es nicht so sehr auf deren Menge an, sondern vor allem auf ihren Abstand zum Objekt.**

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/1485139](http://spektrum.de/artikel/1485139)

► Hinter dem Fenster eines Briefumschlags steckt eine unerlässliche Information: die Anschrift des Adressaten. Darum sind die Folien möglichst transparent. Das funktioniert bei den meisten aber nur, wenn sie unmittelbar auf dem Brief liegen. Hebt man sie von dem Schriftstück ab, so wird es immer unschärfer, bis schließlich nichts mehr zu erkennen ist – als würde man durch eine Nebelwand blicken (siehe Fotos unten).

Dieser Vergleich hilft, eine Erklärung zu finden: Bei Nebel hat man ein Streuphänomen vor Augen. In der Luft driften dann massenhaft Wassertropfen mit Durchmessern von 10 bis 40 Mikrometern. Solche mikroskopischen Hindernisse lenken die Strahlung ab, die von Objekten im oder hinter dem Nebel stammt. Da sie größer sind als die Wellenlänge des Lichts, geschieht das hauptsächlich in Vorwärtsrichtung, die Winkel ändern sich also nicht stark. Dieser Mie-Streuung genannte Effekt verschmiert das Bild von einem Punkt L regelrecht; die Bildinformation scheint auch noch aus einem gewissen Bereich um L herum zu kommen (siehe »Eine Frage der Distanz«, rechts).

**Es ist sonderbar, daß die räumliche Entfernung eine solche Bedeutung haben soll**

Max Frisch (1911–1991)

Für das Auge wirkt es, als ginge ein von einem Streuteilchen S abgelenkter Strahl aus dessen geradliniger rückwärtiger Verlängerung von einem Punkt L' aus. Hier zeigt sich deutlich, wie die Vervielfältigung von Information letztlich zu ihrem Verlust führen kann: Die Bilder beider Punkte überlagern sich, die Ansicht verschwimmt und verschwindet schließlich im abnehmenden Kontrast eines Lichthofs.

Dessen Radius  $r$  hängt einerseits vom Abstand  $d$  zwischen der Lichtquelle und dem streuenden Teilchen ab, andererseits

von den konkreten Gegebenheiten des Streuvorgangs. Diese lassen sich beispielsweise durch einen charakteristischen Winkel  $\alpha$  erfassen, bei dem die Lichtintensität auf die Hälfte des Werts des Punkts L abgefallen ist. Entsprechendes gilt für jeden weiteren Punkt innerhalb des Abstands  $r$  von L, so dass sich die Lichthöfe im Auge des Betrachters überlappen.

Mit zunehmender Anzahl der Streuteilchen und mit wachsendem Abstand  $d$  von den Lichtpunkten eines Gegenstands wirkt dieser kontrastärmer und unschärfer, bis er gar nicht mehr zu erkennen ist – der Blick wird vernebelt. Je mehr Streuteilchen in der Luft sind und je weiter ein Objekt entfernt ist, desto undeutlicher ist es zu sehen.

Mit einem einfachen Experiment kann man das nachvollziehen. Dazu legt man eine Münze in ein Trinkglas und bedeckt sie anschließend mit Wasser, das vorher mit wenigen Tropfen Milch getrübt wurde. Die Schichtdicke sollte gerade so hoch sein, dass die Münze noch gut zu erkennen ist. Der leichte Schleier ist das Ergebnis einer Streuung an wenigen Mikrometer großen, frei in der Milch beweglichen Fettkügelchen. Sie haben ähnliche



**Mit zunehmender Entfernung vom Adressfenster eines Briefumschlags wird darunter liegende Schrift immer unschärfer.**



Eine Nebelwand verschleiert die Gegenstände dahinter umso stärker, je weiter sie entfernt sind.

H. JOACHIM SCHLICHTING

anhand unserer vorigen Überlegungen klarmachen können, spielt der Abstand der Schwebepartikel vom Gegenstand eine wichtige Rolle. Die mittlere Distanz ist im Fall der höheren Schicht wesentlich größer. Das verbreitert den Zerstreuungshof.

Der Einfluss des Abstands wird noch deutlicher, wenn man das Geldstück unter eine flache, transparente Schale legt und in diese das Milchwasser füllt. Hebt man sie an, wird die Münze immer unschärfer und ist bald nicht mehr zu sehen.

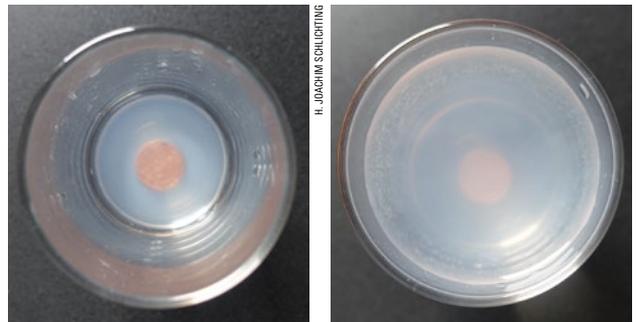
Den gleichen Eindruck gewinnt man beim Adressfenster eines Briefumschlags. Die Folien enthalten also vermutlich winzige Elemente, die bei wachsender Distanz zur darunter liegenden Schrift die Transparenz trüben. Im Rahmen unseres Modells können wir dieses Verhalten verstehen: Der durch eine streuende Schicht im Abstand  $d$  hervorgerufene Halo verschwindet, wenn  $d$  gegen null geht, sich die Folie also unmittelbar über dem durch sie betrachteten Objekt befindet. Die durch den Winkel  $\alpha$  charakterisierte Vernebelung macht sich erst mit zunehmendem Abstand bemerkbar.

Durchmesser wie die Wassertropfchen des Nebels. Es kommt also auch hier zur Vorwärtsstreuung des Lichts – sie ist außerdem der Grund, warum Milch weiß erscheint.

Anschließend gibt man klares Wasser hinzu, verdünnt also die Emulsion. Anders als man es vielleicht erwarten würde, ist die Münze daraufhin nicht etwa deutlicher oder zumindest unverändert gut zu erkennen. Stattdessen verschwimmt sie mit zunehmender Wasserhöhe (siehe Fotos rechts).

### Wie mehr Nähe für besseren Durchblick sorgt

Das Ergebnis ist auf den ersten Blick erstaunlich. Schließlich trifft das von den Münzen ausgehende und die Emulsion durchquerende Licht in beiden Fällen auf dieselbe mittlere Zahl an Streuteilchen. Doch wie wir uns



Eine Münze ist noch gut auf dem Boden eines Glases zu erkennen, wenn man sie mit einer geringen Menge milchigen Wassers bedeckt (links). Gibt man zusätzlich klares Wasser hinzu, erscheint sie unschärfer (rechts).

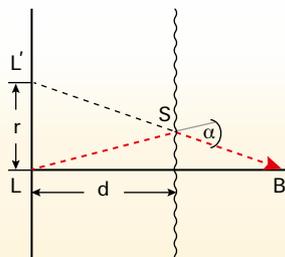
H. JOACHIM SCHLICHTING

H. JOACHIM SCHLICHTING

## Eine Frage der Distanz

Licht von einer Punktquelle  $L$  wird von einem Streuzentrum  $S$  auf einer Oberfläche im Abstand  $d$  abgelenkt. Ein Beobachter  $B$  sieht darum nicht nur Licht direkt von  $L$ , sondern auch aus der Richtung von  $S$  – als

käme es vom Punkt  $L'$  im Abstand  $r$  von  $L$ . Das Gleiche gilt für weitere Streuteilchen auf der Oberfläche. Es hat darum den Anschein,  $L$  sei von einem Hof umgeben, der von  $d$  sowie einem materialtypischen Winkel  $\alpha$  abhängt.



H. JOACHIM SCHLICHTING

Bei Folien verschiedener Briefumschläge variiert die Abhängigkeit der Streuintensität vom Abstand stark. Es gibt Fabrikate mit großem  $\alpha$  (wie im Fall der Fotos auf der linken Seite, wo bereits nach wenigen Zentimetern kaum noch etwas zu erkennen ist) und solche mit kleinem Streuwinkel, bei denen die Schrift erst sehr viel später unleserlich wird.

Die Fensterfolien sind also so etwas wie eine stark komprimierte Nebelwand, in der die Streuteilchen auf die Dicke der Folie zusammengepresst sind. Es drängt sich die Frage auf: Wozu ist das gut? Sofern der Effekt bewusst erzeugt wird, zum Beispiel durch Aufrauen der Oberfläche, soll das vermutlich spiegelnde Reflexionen vermeiden und damit das Ablesen bei widrigen Lichtverhältnissen erleichtern. Es kann sich aber ebenso um ein reines Epiphänomen handeln, also eine zufällige herstellungsbedingte Eigenschaft der verwendeten Folien.

# MATHEMATISCHE LOGIK

## BEDROHLICHE UNENTSCHEIDBARKEIT

**Aussagen, die man prinzipiell weder beweisen noch widerlegen kann, sind keineswegs so esoterisch, wie es klingt. Man findet sie, indem man das Verhalten kleiner Turing-Maschinen untersucht.**



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

» [spektrum.de/artikel/1485141](http://spektrum.de/artikel/1485141)

Wenn ein mathematisches Problem einfach aussieht, wie die Frage »Ist  $4n^4+1$  für alle natürlichen Zahlen eine Primzahl?«, dann ist der durchschnittliche Mathematiker überzeugt, es lösen zu können. Im Einzelfall werden unterschiedliche Auffassungen darüber bestehen, wie schwierig ein konkretes Problem ist; aber je besser sich ein Mathematiker in einem Teilgebiet auskennt, desto sicherer ist sein Urteil über den Schwierigkeitsgrad.

In manchen Fällen versagt allerdings die Erfahrung der fähigsten Fachvertreter. Pierre de Fermat (1607–1665) hat sich sicherlich nicht vorgestellt, dass die unschuldig aussehende Aussage »Es gibt keine Lösung der Gleichung  $n^q + m^q = p^q$  mit natürlichen Zahlen  $n$ ,  $m$  und  $p$  und einer

natürlichen Zahl  $q > 2$ « seine wissenschaftlichen Nachkommen 350 Jahre lang beschäftigen würde. Hinter scheinbar einfachen Aussagen verbergen sich zuweilen äußerst hartnäckige Hindernisse.

Die schwierigsten Probleme sind diejenigen, die man als »unentscheidbar« bezeichnet. Und was tun die Mathematiker? Sie suchen nach den einfachsten unter den unentscheidbaren Problemen. Dieses Spiel ist keineswegs müßig; es hilft die wesentlichen Hindernisse genauer einzugrenzen, die einer Lösung oder eben der Entscheidbarkeit entgegenstehen. Das wiederum bringt die Problemlösefähigkeit voran – und damit die Mathematik im Allgemeinen.

Was genau bedeutet Unentscheidbarkeit? Eine Aussage ist unentscheidbar in einer gegebenen Theorie, wenn sie sich in dieser Theorie weder beweisen noch widerlegen lässt. Und diese doppelte Unmöglichkeit muss ihrerseits beweisbar sein. Damit das überhaupt möglich ist, muss man die Theorie sehr präzise definiert haben und sie mindestens so weit beherrschen, dass man in ihr Aussagen beweisen kann.

Solche Theorien bereitzustellen und zu erforschen, ist die Aufgabe der mathematischen Logik, die manchmal auch Metamathematik genannt wird, weil sie mit mathematischen Mitteln ein Verständnis der Mathematik liefert. Dank ihrer Fortschritte im 19. und 20. Jahrhundert können wir heute die »deduktive Mächtigkeit« einer Theorie genau bestimmen, das heißt die Klasse der Aussagen, die in ihr beweisbar sind.

Drei klassische unentscheidbare Aussagen haben eine gewisse Berühmtheit erlangt. Die erste ist das Parallelenaxiom: Durch einen Punkt außerhalb einer gegebenen

### AUF EINEN BLICK LÖCHER IM KOSMOS DER ABSTRAKTION

- 1 Nach den gödelschen Unvollständigkeitssätzen hat jede formale Theorie Lücken. Sie kann insbesondere ihre eigene Widerspruchsfreiheit nicht beweisen.
- 2 Bisher galten diese Lücken als theoretisch bedeutsam, aber für die praktische Arbeit irrelevant: Man erwartete nicht, dass der Beweis eines mathematischen Satzes an einer Unentscheidbarkeit scheitern würde.
- 3 Inzwischen weiß man: Bereits der Wert einer einfach definierten Funktion an der Stelle  $n=1919$  ist wegen einer solchen Lücke prinzipiell unberechenbar.

Geraden  $g$  gibt es genau eine Gerade  $g'$ , die  $g$  nicht schneidet. Es ist nicht möglich, diese Aussage oder ihre Negation aus den übrigen Axiomen der ebenen Geometrie herzuleiten. In der Tat: Nimmt man an Stelle des Parallelaxioms eine der möglichen Verneinungen (»es gibt keine Gerade ...« oder »es gibt mehr als eine Gerade ...«) zur Geometrie der Ebene hinzu, so erhält man an Stelle der gewöhnlichen euklidischen Geometrie eine nichteuklidische, die ebenso widerspruchsfrei ist wie die gewohnte.

Die beiden anderen Aussagen beziehen sich auf die klassische Mengenlehre. Es handelt sich um das Auswahlaxiom, das unten näher erläutert wird, und die Kontinuumshypothese: Zwischen der Unendlichkeit der natürlichen Zahlen und derjenigen der reellen Zahlen gibt es keine weitere Unendlichkeit.

Es ist unmöglich, auf der Basis der üblichen Axiome der Mengenlehre die Kontinuumshypothese oder ihre Negation zu beweisen. Dasselbe gilt für das Auswahlaxiom. Den ersten Schritt zum Beweis dieser Ergebnisse leistete 1938 der Österreicher Kurt Gödel (1906–1978), den zweiten 1963 der US-Amerikaner Paul Cohen (1934–2007).

Noch allgemeiner gilt nach Gödels erstem Unvollständigkeitssatz von 1931: Ist eine mathematische Theorie  $T$  widerspruchsfrei und ausreichend mächtig, um die üblichen Sätze der Arithmetik zu formulieren (was für alle

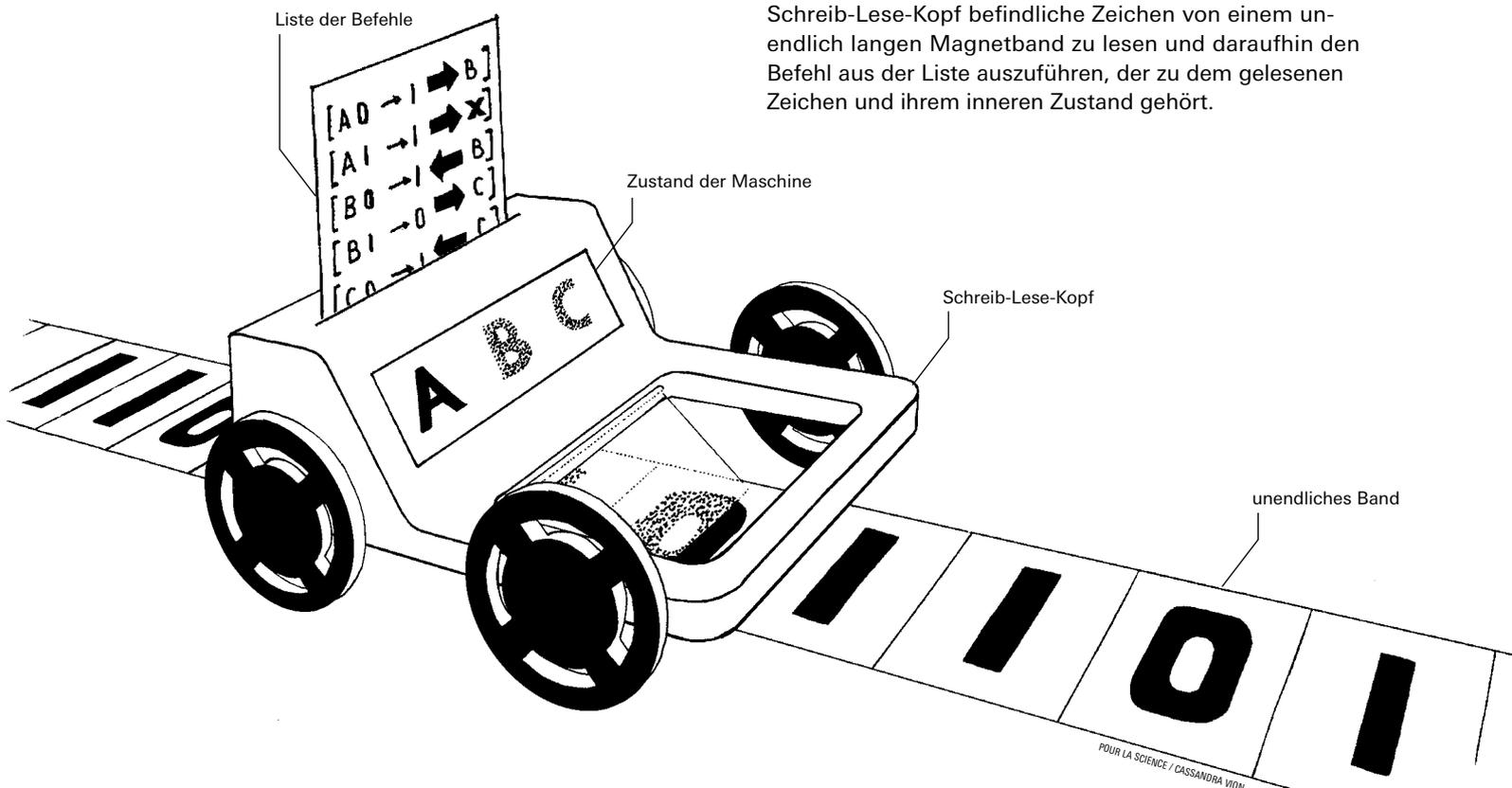
interessanten Theorien der Fall ist), dann gibt es Aussagen  $A$ , die in dieser Theorie sinnvoll, aber unentscheidbar sind. Anders gesagt: Weder die Aussage  $A$  noch ihre Negation ( $\text{non-}A$ ) ist in  $T$  beweisbar. Die Theorie weist Lücken auf, sie ist unvollständig.

Der zweite Unvollständigkeitssatz von Gödel sagt aus, dass die Aussage »Die Theorie  $T$  ist widerspruchsfrei« in  $T$  unentscheidbar ist: Eine Theorie ist niemals stark genug, um ihre eigene Widerspruchsfreiheit zu beweisen. Wenn das Gegenteil zutrifft, die Theorie also Widersprüche enthält, ist das zwar im Allgemeinen nicht schwer zu beweisen; aber in diesem Fall wäre die Theorie vollkommen uninteressant.

Die Frage der Unentscheidbarkeit ist also eng mit derjenigen nach Widerspruchsfreiheit verknüpft. Und da eine Theorie mit ihrer Widerspruchsfreiheit steht oder fällt, ist diese Frage von zentraler Bedeutung.

Das Wort »widerspruchsfrei« ist leicht gesagt; aber im Rahmen einer formalen Theorie ist es überraschend kompliziert, den entsprechenden Sachverhalt auszudrücken. Eine häufig verwendete Formulierung lautet: »Keine Folge von Formeln, die man gemäß den Regeln der Theorie aufstellen kann, führt auf die Gleichung  $0 = 1$ .« Um mit Aussagen dieser Art im Wortsinn rechnen zu können, überführt man sie in Aussagen über (natürliche) Zahlen

## Schematische Darstellung einer Turing-Maschine



Eine Turing-Maschine tut nichts weiter, als das unter ihrem Schrieb-Lese-Kopf befindliche Zeichen von einem unendlich langen Magnetband zu lesen und daraufhin den Befehl aus der Liste auszuführen, der zu dem gelesenen Zeichen und ihrem inneren Zustand gehört.

## Der fleißige Biber mit drei Zuständen

Der fleißige Biber mit  $n$  Zuständen ist die Maschine, die unter den nicht anhaltenden Turing-Maschinen mit  $n$  Zuständen den Rekord hält, das heißt die maximal mögliche endliche Zahl an Schritten durchführt.

Das Programm des fleißigen Biber mit drei Zuständen enthält sechs Befehle; es wurde von dem ungarischen Mathematiker Tibor Radó gefunden. Die Maschine macht 21 Schritte, bevor sie anhält, und schreibt dabei fünf Einsen aufs Band. Die sechs Befehle lauten:

[ A 0  $\rightarrow$  1 rechts B ],  
 [ A 1  $\rightarrow$  1 rechts HALT ],  
 [ B 0  $\rightarrow$  1 links B ],  
 [ B 1  $\rightarrow$  0 rechts C ],  
 [ C 0  $\rightarrow$  1 links C ],  
 [ C 1  $\rightarrow$  1 links A ].

Die Maschine (rechts schematisch dargestellt) wird auf ein Band gesetzt, das in beiden Richtungen (nach rechts und nach links) mit un-

endlich vielen Nullen beschrieben ist. Nehmen wir an, sie befinde sich im Zustand A, ihr Schreib-Lese-Kopf liest eine 0. Der anzuwendende Befehl ist folglich der erste [ A 0  $\rightarrow$  1 rechts B ] in ihrem Programm. Die Maschine schreibt eine Eins, wandert ein Feld nach rechts und geht in den Zustand B über. Nehmen wir an, dass die Maschine zu Anfang auf dem vierten Feld sitzt, und kennzeichnen wir die Position des Schreib-Lese-Kopfs durch rote Farbe, so wird aus dem Anfangszustand des Systems

A 000000000000000000...  
 der Zustand

B 000100000000000000...

Die Maschine ist nun im Zustand B und liest eine Null. Sie wendet folglich Befehl Nummer 3 [ B 0  $\rightarrow$  1 links B ] an, was folgende Situation ergibt:

B 000110000000000000...

Die Berechnung verläuft nun folgendermaßen bis zum Anhalten:

A – 00000000000000000000...  
 B – 00010000000000000000...  
 B – 00011000000000000000...  
 C – 00001000000000000000...  
 A – 00001000000000000000...  
 B – 00011000000000000000...  
 C – 00010000000000000000...  
 C – 00010100000000000000...  
 C – 00011100000000000000...  
 A – 00011100000000000000...  
 B – 00111100000000000000...  
 C – 00101100000000000000...  
 A – 00101100000000000000...  
 B – 00111100000000000000...  
 C – 00110100000000000000...  
 A – 00110100000000000000...  
 B – 00111100000000000000...  
 C – 00111000000000000000...  
 C – 00111010000000000000...  
 C – 00111100000000000000...  
 A – 00111110000000000000...  
 HALT – 00111110000000000000...

und die Regeln der Theorie in Rechenregeln. Diese »Arithmetisierung der Syntax« ist ein schwieriger und langwieriger Prozess, dessen Konzept wir ebenfalls Kurt Gödel verdanken.

Dass es überhaupt unentscheidbare Aussagen gibt, wissen wir, weil die Mathematiker eigens zu diesem Zweck und unter beträchtlichen Mühen welche konstruiert haben. Muss man aber ernsthaft damit rechnen, dass man sozusagen bei der täglichen Arbeit über eine unentscheidbare Aussage stolpert, ohne danach gesucht zu haben? Neuere Ergebnisse lassen vermuten, dass das Risiko längst nicht so klein ist, wie man gedacht hat.

### Unentscheidbarkeit bei einfachen Aussagen?

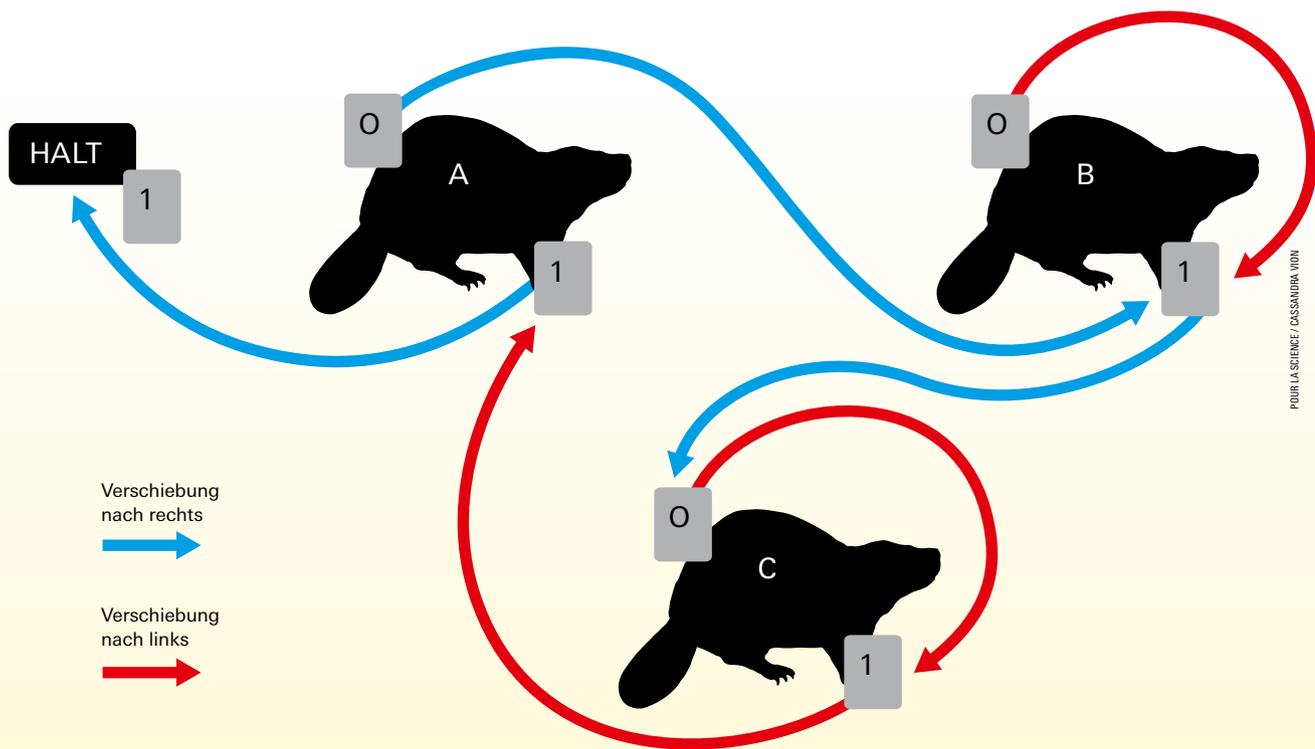
Es gibt eine Funktion, die nach ihrem Erfinder, dem ungarischen Mathematiker Tibor Radó (1895–1965), benannt ist. Sie ist wohldefiniert, das heißt, es gibt eine eindeutige Vorschrift, die jeder natürlichen Zahl  $n$  einen Funktionswert  $s(n)$  zuordnet. Aber für  $n = 1919$  ist dieser Wert unberechenbar. Das heißt: Jede Aussage, die diesen Wert bestimmen würde, ist in der mächtigen klassischen Mengenlehre unentscheidbar.

Die Radó-Funktion ist über ein Konzept definiert, das Alan Turing (1912–1954) 1936 eingeführt hat. Eine Turing-Maschine (Bild S. 73) ist ein Automat, der nur endlich viele Zustände annehmen kann. Mit einem Schreib-Lese-Kopf kann er Symbole von einem Magnetband, das in Felder

eingeteilt ist, lesen und auf das Band schreiben, insbesondere bereits vorhandene Symbole überschreiben. Die Maschine kann zu jedem Zeitpunkt nur auf ein Feld des Magnetbands zugreifen und in jedem Arbeitsschritt auf dem Band ein Feld nach rechts oder links wandern. Ihre Arbeit besteht darin, dass sie entsprechend ihrem Programm und den auf dem Band vorgefundenen Symbolen das Band durchläuft und dabei neu beschreibt. Man nennt diese Arbeit »Rechnen«, denn eine Turing-Maschine kann mit dieser Primitivausstattung tatsächlich Rechenoperationen durchführen – im Prinzip sogar alles berechnen, was überhaupt berechenbar ist; aber das ist eine andere Geschichte.

Das Programm der Maschine besteht aus einer endlichen Liste von Befehlen der Form [A 0  $\rightarrow$  1 rechts B]. Das bedeutet: »Wenn du im Zustand A bist und im aktuellen Feld 0 vorfindest, schreibe 1 in dieses Feld, wandere ein Feld nach rechts und gehe in den Zustand B über.«

Betrachten wir zum Beispiel eine Maschine mit zwei Zuständen A und B und den Befehlen [A 0  $\rightarrow$  0 rechts A], [A 1  $\rightarrow$  0 rechts A] sowie [A 2  $\rightarrow$  0 links B]. Setzt man den Schreib-Lese-Kopf der Maschine an den Anfang eines Bandes mit den Einträgen 0101101020010..., so durchläuft sie dieses Band von links nach rechts und ersetzt die Einsen durch Nullen. Erreicht sie die 2, so läuft sie ein Feld zurück und hält an, denn es gibt keinen Befehl, der ihr sagen würde, was sie im Zustand B tun soll.



Ein unendliches Band, das nur Nullen und Einsen enthält, durchläuft die Maschine nach rechts, ohne jemals stehen zu bleiben, wobei sie jede Eins durch eine Null ersetzt. Es ist also möglich, dass eine Turing-Maschine unendlich lange arbeitet, ohne anzuhalten.

Ein Zustand wie B in unserem Beispiel, für den kein Befehl existiert, ist ein »Haltezustand«. Es ist üblich, den Haltezustand nicht mitzuzählen. (Man kann den Befehlsatz einer Turing-Maschine stets so formulieren, dass es nur einen Haltezustand gibt.) Dementsprechend ist die Maschine aus unserem Beispiel eine Ein-Zustand-Maschine. Im Folgenden beschränken wir uns, bis auf ausdrücklich erwähnte Ausnahmen, auf den Anfangszustand, in dem das (möglicherweise unendliche) Band nur mit Nullen beschrieben ist. Weiter setzen wir voraus, dass es nur die beiden Symbole 0 und 1 gibt.

### Fleißige Biber

Wenn man eine kleine Maschine, also eine mit wenigen Zuständen und wenigen Befehlen, auf ein Band mit lauter Nullen setzt, wird sie entweder unendlich lange rechnen, indem sie beispielsweise das Band durchläuft und alle Nullen in Einsen verwandelt oder indem sie zwischen zwei Feldern hin- und herpendelt, ohne irgendetwas zu tun; oder sie wird eine kurze Rechnung durchführen und dann anhalten. Eine einfache Maschine produziert entweder eine unendliche Rechnung oder eine kurze. Und just diese

Unterscheidung führt, wie wir sehen werden, geradewegs auf die einfachsten Formen der Unentscheidbarkeit.

Im Jahr 1962 interessierte sich Tibor Radó für die maximale Anzahl der Arbeitsschritte, die eine Turing-Maschine mit  $n$  Zuständen ausführt, bevor sie anhält – wenn überhaupt. Diese Zahl bezeichnet man mit  $s(n)$  und eine Maschine, die das Maximum erreicht, als »fleißigen Biber« (»busy beaver«, siehe **Spektrum** November 1984, S. 8, und Januar 1985, S. 13). Die Zahl  $s(n)$  ist eindeutig definiert, denn es gibt nur endlich viele mögliche Befehle und daher auch nur endlich viele Maschinen mit  $n$  Zuständen, die nur die Symbole 0 und 1 verwenden: Es sind  $(4n + 2)^{2n}$  Stück.

Um also  $s(n)$  für eine gegebene Zahl  $n$  zu berechnen, genügt es, alle Maschinen mit  $n$  Zuständen laufen zu lassen und unter denen, die anhalten, diejenige zu finden, die am längsten läuft. Natürlich kann man eine Turing-Maschine auf einem gewöhnlichen Computer simulieren, und bei den heute verfügbaren unglaublichen Rechenleistungen sollte es kein Problem sein, in kurzer Zeit alle Maschinen aus dem endlichen Sortiment durchzuspielen.

Aber das ist ein großer Irrtum! Trotz beachtlicher Anstrengungen kennt man bis heute nur die Werte  $s(1) = 1$ ,  $s(2) = 6$ ,  $s(3) = 21$  und  $s(4) = 107$ . Weiter weiß man, dass  $s(5) \geq 47\,176\,870$  und  $s(6) \geq 7,4 \cdot 10^{36534}$  ist (siehe »Die Turing-Maschinen, die am längsten rechnen«, S. 76). Es gibt nämlich eine Maschine mit fünf Zuständen, die nach 47 176 870 Schritten anhält, sowie eine Sechs-Zustände-

## Die Turing-Maschinen, die am längsten rechnen

Zu jeder natürlichen Zahl  $n$  gibt es eine Rekord-Turing-Maschine (den »fleißigen Biber«) mit  $n$  Zuständen. Das bedeutet: Jede andere Maschine mit  $n$  Zuständen, die nur die Symbole 0 und 1 verwendet, hält entweder früher an als der fleißige Biber oder gar nicht. Die Anzahl der Schritte des fleißigen Bibers mit  $n$  Zuständen wird mit  $s(n)$  bezeichnet.

Bislang sind folgende Resultate bekannt:  
 $s(1) = 1$ ,  $s(2) = 6$ ,  $s(3) = 21$  (Lin und Radó, 1965),  
 $s(4) = 107$  (Brady, 1975);  $s(5) \geq 47\,176\,870$  (Marxen und Buntrock, 1990);  $s(6) \geq 7,4 \cdot 10^{36534}$  (Kropitz, 2000);

$$s(7) > 10^{10^{10^{10^7}}} \quad (\text{Wythagoras, 2014}).$$

Der fleißige Biber mit zwei Zuständen hält nach sechs Schritten an, nachdem er vier Einsen geschrieben hat. Sein Programm:

```
[ A 0 → 1 rechts B ],  
[ A 1 → 1 links B ],  
[ B 0 → 1 links B ],  
[ B 1 → 1 rechts HALT ]
```

Der fleißige Biber mit vier Zuständen hält nach 107 Schritten an, nachdem er 13 Einsen geschrieben hat. Sein Programm:

```
[ A 0 → 1 rechts B ],  
[ A 1 → 1 links B ],  
[ B 0 → 1 rechts A ],  
[ B 1 → 0 links C ],  
[ C 0 → 1 rechts HALT ],  
[ C 1 → 1 links D ],  
[ D 0 → 1 rechts D ],  
[ D 1 → 0 rechts A ]
```

Der bislang beste Kandidat für den fleißigen Biber mit fünf Zuständen hält nach 47 176 870 Schritten und 4098 Einsen an. Sein Programm:

```
[ A 0 → 1 links B ],  
[ A 1 → 1 rechts C ],  
[ B 0 → 1 links C ],  
[ B 1 → 1 links B ],  
[ C 0 → 1 links D ],  
[ C 1 → 0 rechts E ],  
[ D 0 → 1 rechts A ],  
[ D 1 → 1 rechts D ],  
[ E 0 → 1 links HALT ],  
[ E 1 → 0 rechts A ]
```

Maschine, die solches nach der genannten astronomischen Zahl von Schritten tut. Allerdings ist sich niemand sicher, ob diese Werte das letzte Wort sind.

Warum ist es so schwierig,  $s(n)$  auszurechnen? Erstens nimmt die Anzahl der Maschinen mit  $n$  Zuständen mit wachsendem  $n$  sehr schnell zu, und es gibt keine Abkürzung: Wer wissen will, nach wie vielen Schritten eine Maschine anhält, dem bleibt bis auf wenige Ausnahmefälle nichts übrig, als sie laufen zu lassen. Zweitens und noch übler: Es gibt kein allgemeines Verfahren, um zu bestimmen, ob eine Maschine überhaupt anhält. In einigen Fällen gelingt das durch Analyse des Befehlssatzes; aber man stößt schnell auf Maschinen mit komplexem Verhalten, die sich dieser Analyse entziehen. Also weiß man nicht, ob sie vielleicht doch einen Beitrag zur Bestimmung von  $s(n)$  liefern oder ob sie immer weiterlaufen und deshalb für  $s(n)$  irrelevant sind.

Schlimmer noch: Es kann keinen allgemeinen Algorithmus geben, der diese Frage beantwortet. Das ist die berühmte Unentscheidbarkeit des Halteproblems, die Turing 1936 bewiesen hat. Kein Algorithmus ist fähig, für jede gegebene Maschine dieses Typs festzustellen, ob sie anhält oder nicht.

Folglich ist auch  $s(n)$  nicht durch einen Algorithmus berechenbar. Aus diesem Grund hat Radó seine Funktion eingeführt. Noch interessanter ist, dass  $s(n)$  schneller wächst als jede algorithmisch berechenbare Funktion.

Dafür hat Radó folgenden Widerspruchsbeweis angegeben: Nehmen wir an, es gäbe eine algorithmisch berechenbare Funktion  $f(n)$ , die  $s(n)$  majorisiert, das heißt, für alle natürlichen Zahlen  $n$  wäre  $f(n) \geq s(n)$ . Dann könnte man algorithmisch herausfinden, ob eine gegebene Maschine mit  $n$  Zuständen anhält oder nicht. Und zwar berechnet man zuerst die Zahl  $f(n)$  und dann  $f(n)$  Rechenschritte der Maschine. Entweder hält sie während dieser Zeit an – dann ist dieser Teil der Berechnung von  $s(n)$  erledigt – oder nicht; dann wird sie niemals anhalten, denn sie hat ja schon mehr als  $s(n)$  Schritte zurückgelegt, was die Maximalzahl der Rechenschritte einer anhaltenden Maschine ist. Also wäre das beschriebene Verfahren ein Algorithmus zur Berechnung von  $s(n)$ . Den kann es nicht geben, siehe oben. Also kann es auch die Funktion  $f(n)$  nicht geben, was zu beweisen war.

Anders ausgedrückt: Jede algorithmisch berechenbare Funktion  $f(n)$  wird irgendwann von  $s(n)$  überholt, oder formal korrekt ausgedrückt: Für jede algorithmisch berechenbare Funktion  $f(n)$  gibt es eine natürliche Zahl  $n_0$  mit der Eigenschaft, dass  $f(n) \leq s(n)$  ist für alle  $n > n_0$ .

### Unentscheidbare Aussagen dank der Radó-Funktion

Zwischen der Funktion von Radó und der Mengenlehre bestehen interessante Zusammenhänge. Diese führen uns zu neuen kurzen unentscheidbaren Aussagen, die erst vor gut einem Jahr entdeckt wurden.

Die Mengenlehre dient hier als das klassische Exemplar einer Theorie, die so mächtig ist, dass man in ihr die üblichen Sätze der Arithmetik formulieren kann. Die heute gebräuchlichste Version der Mengenlehre wird als ZFC bezeichnet. Dabei stehen Z und F für Ernst Zermelo (1871–1953)

und Abraham Fraenkel (1891–1965), die der Mengenlehre ihre heutige Form gaben, und C (»Choice«) für das Auswahlaxiom. Dieses fordert, dass es zu jeder Familie von nichtleeren Mengen, von denen keine zwei ein Element gemeinsam haben, eine Menge (die »Auswahl«) gibt, die aus jeder Menge der Familie genau ein Element enthält. (»Familie« ist hier nur, der Abwechslung zuliebe, ein anderes Wort für »Menge«.) Interessant ist das Auswahlaxiom für unendliche Familien unendlicher Mengen, die ihrerseits unstrukturiert sind. Sonst könnte man die Auswahl einfach durch das Rezept »Nimm von jeder Menge der Familie das kleinste (oder sonst wie ausgezeichnete) Element« definieren. Man verwendet nun ZFC seit einem Jahrhundert und ist noch nie auf einen Widerspruch gestoßen. Wir nehmen deshalb an, es gebe keinen.

Man beweist nun: Ist eine Funktion  $u(n)$  nicht algorithmisch berechenbar, so kann die Mengenlehre ZFC nicht

alle ihre Werte liefern. Formal korrekt ausgedrückt: Es existiert mindestens eine natürliche Zahl  $n$ , so dass die Aussage  $u(n) = k$ , die den Wert der Funktion  $u$  an der Stelle  $n$  angibt, in ZFC unentscheidbar ist. Das trifft auch in einer beliebigen anderen widerspruchsfreien Theorie zu, die man an Stelle von ZFC verwendet, allerdings nicht unbedingt mit demselben  $n$ .

Was die Funktion  $s(n)$  von Radó betrifft, so weiß man seit 1962, dass es bei Verwendung von ZFC mindestens eine natürliche Zahl  $n_0$  gibt, für die man den Wert  $s(n_0)$  nicht bestimmen kann: Weder die Aussage  $s(n_0) = k$  noch ihre Negation sind für das richtige  $k$  in ZFC beweisbar. Die Berechnung von  $s(n_0)$  übersteigt die deduktive Mächtigkeit der Theorie.

Wie groß ist  $n_0$ ? Ungefähr 10? 1000? Oder eher in der Nähe von 100 Milliarden? Diese Frage stellten sich Scott Aaronson, Professor am MIT, und sein Student Adam

## Fleißige Biber berechnen die Entropie

Die Kenntnis der Werte von Radós Funktion  $s(n)$  verhilft zu unerwarteten Ergebnissen. Unter der Annahme, dass der vermutete Wert  $s(5) = 47\,176\,870$  der richtige sei, hat eine Arbeitsgruppe um Fernando Soler-Toscano von der Universidad de Sevilla (Spanien) die Kolmogorow-Komplexität kurzer Folgen aus Nullen und Einsen berechnet. Diese Größe wird auch »algorithmische Entropie« genannt, weil sie eine Verallgemeinerung der statistischen Entropie aus Claude Shannons Informationstheorie ist.

Die Kolmogorow-Komplexität einer (endlichen) Folge ist definiert als die Länge des kürzesten Programms, das als Output die Folge erzeugt. Wenn die Folge überhaupt keine Regelmäßigkeit hat, ist das kürzeste erzeugende Programm dasjenige, das die Folgenglieder der Reihe nach aufzählt, und damit im Wesentlichen so lang wie die Folge selbst.

Diese klassische Definition funktioniert nicht für sehr kurze Folgen, da Programme eine gewisse Mindestlänge zu haben pflegen, die auch noch von der verwendeten Programmiersprache abhängt (diese Unterschiede werden bedeutungslos für lange Folgen). Aber es

gibt eine Alternative: Wenn eine Folge eine große Regelmäßigkeit (und damit eine geringe Komplexität) hat, dann wird es unter allen Turing-Maschinen mit – zum Beispiel – fünf Zuständen sehr viele geben, die diese Folge produzieren.

Man zählt also unter allen anhaltenden Turing-Maschinen mit fünf Zuständen aus, wie viele von ihnen eine bestimmte Folge aufs Band schreiben, bevor sie anhalten. Je größer diese Anzahl, desto geringer ist die Komplexität der Folge. Genauer: Nach einer Formel von Leonid Levin ist die Komplexität  $K(t)$  der Folge  $t$  näherungsweise gleich  $-\log_2(k/N(5))$ , also dem negativen Zweierlogarithmus des Bruchteils aller Turing-Maschinen, die  $t$  produzieren.  $k$  ist die Anzahl dieser Maschinen und  $N(5) = 22^{10} = 26\,559\,922\,791\,424 \approx 2,6 \cdot 10^{13}$  die Gesamtzahl aller Turing-Maschinen mit fünf Zuständen.

Wie bestimmt man  $k$ ? Man lässt jede der  $N(5)$  Maschinen laufen, bis sie anhält oder bis sie  $s(5)$  Schritte vollführt hat. Um diese gigantische Rechnung überhaupt durchführen zu können, muss man also  $s(5)$  kennen, ersatzweise den oben genannten Schätzwert. Wenn  $s(5)$  doch noch größer sein sollte als

47 176 870, bleiben die Maschinen, die jenseits dieser Schrittzahl doch noch anhalten, unberücksichtigt. Man hofft, dass diese am Ergebnis nicht mehr viel ändern.

Die Formel von Leonid Levin ist bemerkenswert und sehr tief liegend. Sie bedeutet, dass die komplexen Folgen (das sind solche, für die das sie erzeugende Programm lang ist) auch diejenigen sind, die eine zufällig ausgewählte Maschine mit der kleinsten Wahrscheinlichkeit erzeugt.

Die Tabelle zeigt einige der so berechneten Werte.

FOLGE	HÄUFIGKEIT	ENTROPIE
1	0,175036	2,51428
0	0,175036	2,51428
11	0,0996187	3,32744
10	0,0996187	3,32744
01	0,0996187	3,32744
00	0,0996187	3,32744
111	0,0237546	5,3962
000	0,0237546	5,3962
110	0,0229434	5,44578
100	0,0229434	5,44578
011	0,0229434	5,44578
001	0,0229434	5,44578
101	0,0220148	5,5038
010	0,0220148	5,5038
1111	0,0040981	7,03083
0000	0,0040981	7,03083
1110	0,00343136	8,187
1000	0,00343136	8,187
0111	0,00343136	8,187
0001	0,00343136	8,187

## Goldbach-Maschinen und Riemann-Maschinen

Eine Turing-Maschine, die in der Mengenlehre ZFC einen Widerspruch sucht (und vermutlich nie anhält, weil es keinen gibt), ist groß und unhandlich – wenig verwunderlich bei der Größe der Aufgabe. Da ist es durchaus interessant, das Problem und die zugehörige Maschine einige Nummern kleiner zu wählen.

Man konstruiere eine Turing-Maschine, die ein Gegenbeispiel zur Goldbach-Vermutung sucht (**Spektrum** Dezember 2008, S. 94): Das wäre eine gerade natürliche Zahl größer als 2, die sich nicht als Summe zweier Primzahlen schrei-

ben ließe. Eine derartige »Goldbach-Maschine« hält nur an, wenn die Goldbach-Vermutung falsch ist. Die Anzahl der Zustände dieser Turing-Maschine, die man versucht, möglichst klein zu halten, ist ein Maß für die Schwierigkeit der Vermutung. Der kürzlich erzielte Rekord ist 47. Ein Mensch, der nur unter seinem Internet-Spitznamen »code golf addict« bekannt ist, hat eine Maschine mit 27 Zuständen ins Netz gestellt, die noch der Nachprüfung harret. Wenn sich herausstellen sollte, dass die Goldbach-Vermutung unentscheid-

bar in ZFC ist, dann wäre bereits  $s(47)$  in ZFC unberechenbar.

Dieselbe Argumentation gilt für die berühmte riemannsche Vermutung aus der Zahlentheorie (**Spektrum** September 2008, S. 86). Sie besagt, dass die nichttrivialen Nullstellen der riemannschen Zetafunktion alle den Realteil  $\frac{1}{2}$  besitzen. Zudem liefert sie genauere Angaben über die Verteilung der Primzahlen.

Die kleinste derzeit bekannte Turing-Maschine, die genau dann anhält, wenn die riemannsche Vermutung falsch ist, hat 744 Zustände.

Yedidia. Interessant ist es, ein möglichst kleines  $n_0$  zu finden; denn wenn die Theorie für ein gewisses  $n_0$  versagt, dann auch für alle folgenden. Versagen bedeutet ja, dass das Verhalten einer Turing-Maschine mit  $n_0$  Zuständen nicht entscheidbar ist. Es ist aber kein Problem, eine Maschine zu definieren, die mehr Zustände hat als die problematische, sich jedoch genau so verhält (weil sie die zusätzlichen Zustände nie annimmt). Außerdem bietet ein kleines  $n_0$  den morbiden Reiz, dass die gefürchtete Unentscheidbarkeit sozusagen um die Ecke lauert.

Aaronson und Yedidia konnten beweisen, dass ZFC für  $n = 7918$  versagt. Kein Mathematiker, der mit der klassischen Mengenlehre arbeitet, wird jemals  $s(7918)$  kennen können. Anders gesagt: Unter den Turing-Maschinen mit 7918 Zuständen, die nicht anhalten, tun dies einige aus Gründen, welche die Theorie nicht analysieren kann. Dies ist das erste Mal, dass man eine in der Mengenlehre unentscheidbare Aussage derart konkret benennen kann.

Kaum hatten Yedidia und Aaronson im Mai 2016 ihre Arbeit publiziert, folgten andere, die mit verbesserten Beweistechniken den Wert von  $n_0$  drücken konnten. Stefan O'Rear bewies, dass ZFC für  $s(5349)$  versagt, und besserte diese Zahl wenige Tage später nochmals nach: Auch  $s(1919)$  liegt außerhalb der Reichweite von ZFC.

Seitdem kann niemand mehr behaupten, dass die in der Mengenlehre unentscheidbaren Aussagen esoterisch und – über ihre Unentscheidbarkeit hinaus – völlig uninteressant wären. Die Frage nach dem Wert von  $s(1919)$  ist vollkommen natürlich, denn sie betrifft den elementarsten Teil der mathematischen Theorie der Berechnung.

Die Methode von Yedidia und Aaronson ist interessant, weil sie an entscheidender Stelle neue Wege geht. Üblicherweise würde man alle Beweise, die man in ZFC überhaupt formulieren kann, der Reihe nach aufzählen und daraufhin überprüfen, ob einer von ihnen die Aussage

» $0=1$ « beweist. Mit einem Verfahren (der »Arithmetisierung«), das ebenfalls von Gödel stammt, kann man alle diese – in einer formalen Sprache ausgedrückten – Beweise in Zahlen verwandeln und mit diesen Zahlen rechnen; also kann man diese Aufgabe auch einer Turing-Maschine anvertrauen.

Eine solche Maschine wird niemals anhalten, denn ZFC ist widerspruchsfrei; aber das kann man nicht beweisen, weil sonst ZFC ihre eigene Widerspruchsfreiheit beweisen würde, was nach dem zweiten gödelschen Unvollständigkeitssatz unmöglich ist. Die so konstruierte Turing-Maschine hätte jedoch mehrere 100 000 oder gar Millionen Zustände. Folglich würde man die Unentscheidbarkeit von  $s(n) = k$  nur für ein  $n$  in dieser Größenordnung beweisen.

### Die Maschine Z hält niemals an

Aaronson und Yedidia vermeiden diese riesigen Zustandszahlen mit Hilfe neuerer Arbeiten von Harvey Friedman, Emeritus der Ohio State University. Friedman arbeitet seit Jahren arithmetische Aussagen aus, die in ZFC oder anderen Theorien unentscheidbar sind. Eine dieser Aussagen bezieht sich auf eine Eigenschaft von Graphen; sie ist äquivalent zu der Aussage, dass ZFC widerspruchsfrei ist. Diese Aussage ist zwar zu abstrakt, um hier erklärt werden zu können, lässt sich jedoch vergleichsweise leicht in arithmetischen Ausdrücken formulieren. Eine Maschine, die ein Gegenbeispiel zu ihr sucht, ist folglich relativ einfach im Vergleich zu derjenigen, die man durch direkte Arithmetisierung von ZFC erhalten würde.

Der Rest des Arguments verläuft wie oben. Die Maschine – man nennt sie Z – prüft der Reihe nach einen Graphen nach dem anderen, ob er die genannte Eigenschaft besitzt. Sie hält an, wenn das nicht der Fall ist. Das wird zwar nicht passieren, denn ZFC ist widerspruchsfrei. Es ist jedoch unmöglich, zu beweisen, dass sie nicht anhalten

wird, denn sonst würde ZFC wieder ihre eigene Widerspruchsfreiheit beweisen.

Bezeichnen wir die Anzahl der Zustände von  $Z$  mit  $n_0$ . Um  $s(n_0)$  zu kennen, müsste man in ZFC für jede Maschine mit  $n_0$  Zuständen, die nicht anhält, beweisen können, dass sie nicht anhält. Es gibt aber eine solche Maschine, nämlich  $Z$ , für die das unmöglich ist. Also kann ZFC die Aussage  $s(n_0) = k$  nicht für den richtigen Wert von  $k$  beweisen.

Übrigens ist die fragliche Eigenschaft von Graphen in einer Theorie beweisbar, die nur wenig stärker ist als ZFC. Folglich hat man allen Grund zu der Annahme, sie sei wahr. Zu allem Überfluss ließen Aaronson und Yedidia ihre – im Computer simulierte – Maschine  $Z$  tatsächlich laufen, um zu sehen, ob sie anhält. Nach einigen Stunden hatte sie nicht angehalten.

Die Arbeiten Friedmans lieferten zwar eine große Abkürzung; aber damit allein wären die heute bekannten kleinen Werte von  $n_0$  nicht zu finden gewesen. Das gelang erst mit einer zweiten originellen Idee. Aaronson und Yedidia schufen eine formale Sprache namens Laconic, mit der Friedmans Eigenschaft sehr knapp ausgedrückt werden kann – lakonisch eben. Zusätzlich schrieben sie ein Übersetzungsprogramm, das aus einem Text in Laconic eine Turing-Maschine nach den Vorgaben von Radó macht. So kamen sie zu ihrer Maschine mit 7918 Zuständen. Verbesserungen an der Sprache und dem Übersetzungsprogramm führten zu der Reduktion auf 1919.

Es ist anzunehmen, dass man auch den Rekord  $n_0 = 1919$  noch unterbieten kann. Immerhin ist der Wert  $s(5)$  bereits so schwierig zu berechnen, dass er bis heute unbekannt ist. Irgendwo zwischen 5 und 1919 stößt ZFC an ihre prinzipiellen Grenzen, und zwar, so wie es heute aussieht, eher früher als später. Vielleicht ist in der Stunde, in der Sie das lesen, der Rekord bereits gebrochen. Ein Blick in Scott Aaronsons Blog [www.scottaaronson.com/blog/](http://www.scottaaronson.com/blog/) dürfte Klarheit schaffen. ◀

#### QUELLEN

**Aaronson, S.:** The 8000th Busy Beaver Number Eludes ZF Set Theory: New paper by Adam Yedidia and me. [www.scottaaronson.com/blog/?m=201605](http://www.scottaaronson.com/blog/?m=201605), Mai 2016

**Calude, C. S., Calude, E.:** Evaluating the Complexity of Mathematical Problems. Part 1: Complex Systems 18, S. 267–285, 2009; Part 2: Complex Systems 18, S. 387–401, 2010

**Marxen, H.:** List of the Known Busy Beaver values. [www.dr.b.insel.de/~heiner/BB/index.html](http://www.dr.b.insel.de/~heiner/BB/index.html), 2016

**Michel, P.:** The Busy Beaver Competition: A Historical Survey. <https://arxiv.org/abs/0906.3749>, 2009

**Soler-Toscano, F. et al.:** Calculating Kolmogorov Complexity from the Output Frequency Distributions of Small Turing Machines. In: PLoS One 8, e96223, 2014

**Yedidia, A., Aaronson, S.:** A Relatively Small Turing Machine Whose Behavior Is Independent of Set Theory. <https://arxiv.org/abs/1605.04343>, 2016

**Spektrum**  
der Wissenschaft

# SCHREIB- WERKSTATT

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](mailto:service@spektrum.de)  
[spektrum.de/schreibwerkstatt](http://spektrum.de/schreibwerkstatt)



# KIRCHENGESCHICHTE **LUTHERS WURZELN IM SPÄTEN MITTELALTER**



STIFTUNG LUTHERGEDENKSTÄTTEN IN SACHSEN-ANHALT (HERMANN FREIHOLD PLÜDEMANN: LUTHER VOR DEM REICHSTAG ZU WORMS. GEMÄLDE, 1864)

**Die Reformation kam nicht wie ein Blitzschlag aus heiterem Himmel. Martin Luther hat Spannungen, die sich zu seiner Zeit bereits aufgebaut hatten, aufgegriffen und transformiert – mit gewaltigen Folgen.**



**Volker Leppin** promovierte 1994 in Heidelberg; seit 2010 ist er Professor für Kirchengeschichte in Tübingen.

► [spektrum.de/artikel/1485143](https://www.spektrum.de/artikel/1485143)

### 500 Jahre Reformation

Teil 1: August 2017  
**Eine Gelehrtendebatte eskaliert**  
Volker Reinhardt

Teil 2: September 2017  
**Luthers Wurzeln im späten Mittelalter**  
Volker Leppin

Martin Luthers Auftritt auf dem Reichstag zu Worms hat sich höchstwahrscheinlich weniger theatralisch abgespielt, als der Historienmaler Hermann Freihold Plüddemann (1809–1868) ihn Mitte des 19. Jahrhunderts darstellte.



STIFTUNG LUTHERGEDENKSTÄTTEN IN SACHSEN-ANHALT (HERMANN FREIHOLD PLÜDEMANN: LUTHER VOR DEM REICHSTAG ZU WORMS. GEMÄLDE, 1864)

Gerne stellt man sich die Reformation als einen radikalen Bruch mit dem Vergangenen vor: Martin Luther hat bildlich gesprochen mit wuchtigen Hammerschlägen das Mittelalter beendet. Nun ist das mit den Metaphern so eine Sache. In der Realität hat wohl nicht einmal der Thesenanschlag tatsächlich stattgefunden, und der »Bruch« mit dem Mittelalter sieht bei genauerem Hinsehen auch wesentlich anders aus.

Ohne Zweifel hat die Reformation die damalige Welt verändert, mit weit reichenden Konsequenzen. Die konfessionelle Landkarte prägte auf Jahrhunderte hinaus das politische und soziale Leben in Deutschland, und die Auswirkungen dieser Entwicklungen spiegeln sich noch heute in gesellschaftlichen Debatten. Da liegt die Vorstellung nahe, Luther müsse eine radikale Abkehr vom Überkommenen vollzogen haben. Es drängt sich der Gedanke auf, alle vorherigen Ideen seien rückständig gewesen – »finsterstes Mittelalter« eben.

Wissenschaftlich ist dieser Mythos längst überwunden. Und wie auch ohne Geschichtsstudium einleuchtet, kann ein Zeitalter, das prachtvolle Kathedralen, die hochkomplexe Weiterentwicklung der aristotelischen Philosophie und literarische Kunstwerke wie das Nibelungenlied hervorgebracht hat, so finster nicht gewesen sein. Gleichwohl wirkt die negative Einschätzung dieser Epoche bis in moderne Forschungsansätze hinein fort. Und ob ein Historiker das späte Mittelalter eher als eine Zeit der Blüte oder des massiven Niedergangs ansah, hing nicht selten von seiner Konfession ab.

So veröffentlichte Anfang des 20. Jahrhunderts der katholische Forscher Heinrich Suso Denifle (1844–1905) eine provokante These: Luther habe die Heilsangebote des Mittelalters nicht wirklich begriffen und sich daher an einem missverstandenen Mönchtum abgequält. Die Reformation also als Folge der Irrtümer und Verbiegungen eines Mönchs, der es nicht schaffte, seinen eigenen überzogenen Ansprüchen gerecht zu werden? Genau dagegen stellte die evangelische Forschung Ansätze, in denen sie das Mittelalter als die oben erwähnte verfinsterte Epoche zeichnete, am Ende erleuchtet durch die Botschaft Martin

Luthers, das helle Licht des reformatorischen Evangeliums. In der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg entdeckten dann auch die katholischen Forscher im Kontext der aufblühenden ökumenischen Bemühungen dunkle Züge im Mittelalter. Diese sahen sie aber erst etwa ab 1300, und zu dieser Zeit sei das Mittelalter eigentlich nicht mehr katholisch gewesen. Luther habe also gar nicht gegen einen »echten« Katholizismus gekämpft. Wenig überraschend entstanden auf der anderen Seite evangelische Deutungen, die gerade das Spätmittelalter als allerfrömmste Zeit beschrieben – als wäre Frömmigkeit messbar – und Luther an der Spitze und am Umschlagspunkt dieser Entwicklung sahen.

## »Der Herzog von Kleve ist in seinen Ländereien der Papst«

Wo immer man also in der Forschung des 20. Jahrhunderts hinschaut: Das Mittelalter, zumindest das späte, wird eindimensional gezeichnet. Man sieht eine klare Abwärts- oder Aufwärtsentwicklung, die durch die Reformation einen abrupten Bruch erfahren habe. Dass Luther damit im Gegensatz zum Mittelalter gestanden hätte, ist jedoch schon biografisch wenig plausibel: Als er in Konflikt mit seiner Kirche geriet, war er mehr als drei Jahrzehnte in dieser aufgewachsen, hatte in ihr gelebt und Karriere gemacht, war also zweifellos von ihr geprägt. Es stellt sich die Frage, was von dem überkommenen Erbe ihn nachhaltig beeindruckte und was davon er – mehr oder weniger stark umgeformt – auch an seine geistigen Erben vermittelte. Für eine Antwort muss man allerdings bereit sein, das Mittelalter in seiner ganzen Vielfalt wahrzunehmen.

Die Strömungen in der spätmittelalterlichen Religiosität lassen sich anhand von bestimmten Polaritäten oder Spannungen beschreiben. Drei wichtige Beispiele sind die Spannung zwischen Zentralität und Dezentralität in der Leitung der Kirche, zwischen Bestimmung durch die Kleriker und Laienengagement und schließlich die Spannung zwischen innerlicher und äußerlicher Frömmigkeit.

### Erste Spannung:

#### Zentralgewalt der Kirche gegen lokale Herrscher

Unter ihnen ist die erste von herausragender, weil auch staatspolitischer Bedeutung. Damals kursierte der Spruch: »Dux Cliviae papa est in suis terris« (»Der Herzog von Kleve ist in seinen Ländereien der Papst«). Der Gedanke dahinter traf durchaus die kirchliche Situation in vielen Territorien in Deutschland, aber auch in ganz Europa. Der Papst saß weit entfernt, die Leitung der Kirche lag in vielen Bereichen in den Händen der lokalen Herrscher, die das tradierte kirchliche System für ihre politischen Zwecke nutzten. Indem ein Landesherr die Domkapitel, die für die Wahl des Bischofs zuständig waren, passend besetzte, konnte er es arrangieren, dass stets Angehörige seines Hauses in die Nachfolge auf dem Bischofsstuhl kamen. So machten es die brandenburgischen Hohenzollern mit Mag-

## AUF EINEN BLICK TRANSFORMATION STATT REVOLUTION

- 1 Martin Luther hat in der Reformation Spannungen aufgegriffen, die sich unabhängig von ihm zu seiner Zeit bereits aufgebaut hatten.
- 2 So war die Zentralgewalt des Papstes angefochten worden; in Böhmen musste die katholische Kirche sogar eine andere Konfession neben sich dulden.
- 3 Mystiker wie Meister Eckhart hatten mit ihrer Innerlichkeit einen deutlichen Gegenpol zu der äußerlichen Frömmigkeit gesetzt, die den Ablasshandel zuließ.



**Martin Luther als Augustinermönch, Universitätslehrer und Junker Jörg. Das Triptychon (1572) von Veit Thim steht in der Stadtkirche St. Peter und Paul in Weimar.**

deburg, die sächsischen Wettiner mit Meißen, Merseburg und Naumburg, und die Kurfürsten erlangten mehr und mehr Zugriff auf das Bistum Worms. Andererseits waren die Bischöfe neben ihrem kirchlichen Amt selbst Landesherren und traten so auf weltlicher Ebene in Konkurrenz zu den jeweiligen Fürsten und Herzögen, was für zusätzliche Brisanz sorgte.

Es entstand eine Art von Landesbistümern: Formal unterschieden sich Landesgrenzen und Bistumsgrenzen weiterhin, aber die Kompetenzen verschwammen; die Loyalität des Bischofs galt mehr dem ihm verwandten Landesherrn in der Nähe als dem fernen Papst. Darüber hinaus agierten die weltlichen Herrscher teilweise auch direkt. So beeinflusste und reorganisierte neben vielen anderen Fürsten der Herzog von Württemberg Eberhard im Bart (1459–1496) die Klöster in seinem Territorium. Dahinter steckte durchaus das Interesse an den nicht geringen wirtschaftlichen Mitteln, die den Klöstern zur Verfügung standen, aber auch ein echtes Bemühen um religiöse Erneuerung.

Die Entwicklung beschränkte sich nicht auf die deutschen Territorien. Nachdem ab 1378 zunächst zwei, dann sogar drei Päpste gleichzeitig auftraten und miteinander konkurrierten (das »Große Abendländische Schisma«), waren viele Menschen zu der Überzeugung gekommen, dass nicht Rom, sondern allein die Bischöfe aus der ganzen bekannten Welt die Kirche vor Schaden bewahren könnten. So verstand sich das Konzil von Konstanz (1414–1418) ausdrücklich als Repräsentation der gesamten

Christenheit, ebenso wie das spätere Baseler Konzil (1431–1449). Während dem ersten Konzil die Beendigung des damaligen Schismas gelang, überzog das zweite seine Ansprüche so weit, dass es am Ende scheiterte. Der Papst verlagerte das Konzil von Basel nach Ferrara und Florenz, und die meisten Teilnehmer folgten ihm. Nur ein kleiner Rest blieb in Basel. Damit standen den dezentralen wieder die zentralen Kräfte übermächtig entgegen. Bis heute erinnern die in den folgenden Jahrzehnten errichteten Bauten des Vatikans an diese gewaltige Konzentration der Macht in Rom. Damals entstand auch der »Papalismus«: die Theorie, nach der die Kirche in ihrem letzten Kern mit dem Papst selbst zu identifizieren sei.

Im Windschatten dieser Auseinandersetzungen gelang es dem französischen König Karl VII., einige Beschlüsse von Basel so auszunutzen, dass er fortan für sein Land die Besetzung von Bistümern weitgehend bestimmen konnte. Die französische Kirche löste sich zwar nicht von Rom, aber es begann die lang anhaltende Phase der »gallikanischen Freiheiten«, die ihr ein hohes Maß an nationaler Selbstständigkeit gab. In Böhmen kam es gar – noch lange bevor deutsche Historiker gemeinhin die Reformation beginnen lassen – zur Bildung von anerkannten Konfessionen: Ausgerechnet wegen papstkritischer Aussagen war der Prager Theologe Jan Hus 1415 auf dem Konstanzer Konzil zum Tod verurteilt und verbrannt worden. Seine Anhänger revoltierten in Kirche und Gesellschaft. Ihr Symbol wurde der »Laienkelch«, die Forderung, dass in der Eucharistie nicht allein die Priester, sondern alle mitfeiern-

den Gläubigen aus dem Kelch trinken dürfen. Nach langen kriegerischen Auseinandersetzungen, die von Böhmen bis nach Sachsen ausstrahlten, wurde ihre Glaubensgemeinschaft 1485 im Kuttenberger Religionsfrieden anerkannt. Damit gab es in Böhmen fortan zwei Gemeinschaften nebeneinander, die sich auf unterschiedliche Weise als christliche Kirche verstanden – das, was man mit einem späteren Begriff Konfessionen nennt. Europa wurde kirchlich immer vielfältiger. Und gerade Forderungen wie der Laienkelch zeigten ein Bedürfnis nach Einbeziehung aller Gläubigen in das geistliche Geschehen.

### Zweite Spannung:

#### Professionelle Geistlichkeit gegen Laienengagement

Traditionell lag die religiöse Versorgung der Bevölkerung in den Händen und der Bestimmungsgewalt des geistlichen Standes. Kleriker im strengen Sinn waren diejenigen, die zu einem Dienst in der Kirche geweiht waren, vor allem Diakone, Priester und Bischöfe. Allerdings vermischten sich diese in der Außenwahrnehmung mit den Ordensleuten, den Mönchen und Nonnen im Kloster, die ebenfalls ehelos (zölibatär) lebten. Beide Gruppen zusammen stellten in manchen spätmittelalterlichen Städten zehn Prozent der Bevölkerung – und mussten häufig von dieser finanziert werden. Von den vom Konzil von Lyon 1274 festgelegten sieben Sakramenten, die den Menschen von der Taufe bis zur Letzten Ölung begleiteten, dominierten im Alltag Beichte und Abendmahl: Das vierte Laterankonzil von 1215 hatte vorgeschrieben, jede Christin und jeder Christ müsse mindestens einmal im Jahr vor dem eigenen Gemeindepfarrer die Beichte ablegen. Ob die Gläubigen das auch so einhielten, lässt sich schlecht beurteilen; jedenfalls bestand die Forderung, dass sie sich einer durchgängigen Selbstkontrolle im Angesicht eines Priesters unterzogen.

Das mussten sie schon deshalb als Zumutung empfinden, weil zu dieser Zeit ein Antiklerikalismus um sich griff, der sich vor allem an der Unterstellung festmachte, der Klerus, einschließlich der Mönche, bereichere sich persönlich und pflege einen unsittlichen Lebenswandel. Und die Priester nähmen es nicht nur mit dem Zölibat nicht allzu genau, sondern verführten sogar verheiratete Frauen, begingen also die Todsünde des Ehebruchs (Bild rechts). Und vor solch suspekten Gestalten sollte man seine eigenen Sünden bekennen!

Auch beim Zelebrieren des Abendmahls war man ganz von ihnen abhängig. Die Feier der Eucharistie sollte eigentlich der Kirche das Heil Gottes stets neu bringen, konnte aber, verstanden als Opfergabe für Gott, auch dessen Wohlgefallen auf Personen oder Gruppen lenken. Hierzu dienten gestiftete Messen, die der Priester ohne jegliche Gemeindebeteiligung vollzog. Diesem Zweck dienten die vielen Seitenkapellen und -altäre, die in manchen mittelalterlichen Kirchen noch erhalten sind. Religiöse Vereinigungen, die so genannten Bruderschaften, stellten eigens dafür Priester an. Es entstand ein Geschäft auf Gegenseitigkeit: Der Geistliche sorgte für das jenseitige Heil, im Diesseits bezog er ein Gehalt von der Bruderschaft.

Die sakramentale Grundversorgung war aber nur ein Teil der geistlichen Fürsorge. Die Verkündigung und Auslegung des Evangeliums lag oft nicht in den Händen des regulären Pfarrers, sondern eines eigens dafür eingestellten Predigers oder Prädikanten. Auf die Besetzung der entsprechenden Stellen versuchten die städtischen Räte häufig Einfluss zu nehmen. Wie wichtig diese Aufgabe war, machen die prachtvollen Kanzeln in vielen spätmittelalterlichen Kirchen deutlich, aber auch die Gestaltung einer eigenen Gottesdienstform. Anders als die Messe umrahmte dieser Predigtgottesdienst die im Mittelpunkt stehende Predigt lediglich durch eine sehr knappe Liturgie. Das konnte natürlich den zentralen Sonntagsgottesdienst nicht ersetzen, bot aber eine reichlich nachgefragte Ergänzung. Auch beim Predigtgottesdienst waren die Laien auf den Priester angewiesen. Entscheidend war aber nun dessen Bildung, nicht die Weihe allein, denn der Geistliche musste den biblischen Text theologisch angemessen deuten können. Während die meisten normalen Priester nie eine Universität von innen gesehen hatten, kamen die Prediger aus der Bildungsbewegung des Humanismus, die in Schulen wie in Schlettstadt (heute Séléstat) im Elsass ihre Zentren hatte, vielfach aber auch an den Universitäten verbreitet war.

Priester und Prediger trafen zunehmend auf Gemeinden, die eigene Kompetenz in Religionsfragen gewonnen hatten. Die Lesefähigkeit verbreitete sich im städtischen Bürgertum immer mehr, und seit der Erfindung des Buchdrucks gab es reichlich Lektüre. Geistliches Schrifttum gehörte dazu, auch die Bibel selbst. Allein 14 deutsche Ausgaben wurden gedruckt – es kann also keine Rede



Der Mönch schläft mit einer ehrbaren Ehefrau. Aus dem »Decamerone« von Giovanni Boccaccio (1313–1375).

davon sein, dass Laien sie vor der Reformation nicht gekannt hätten. Sie lasen sie und machten sich ihre eigenen Gedanken darüber. Selbst erworbene Bildung und das Bemühen der Bürger um einen christlichen Lebenswandel standen so der den Klerikern durch Weihe zugesprochenen Autorität und der von ihnen gepredigten Frömmigkeit entgegen.

### **Dritte Spannung:**

#### **Innerliche gegen äußerliche Frömmigkeit**

Mit der spätmittelalterlichen Religiosität wird oft in erster Linie der Verkauf von Ablass verbunden. Diese Praxis hatte sich aus dem Sakrament der Buße heraus entwickelt: Nach mittelalterlichem Verständnis vollzog sich die Tilgung der Sünden in den Schritten Reue, Beichte und schließlich Wiedergutmachung. Die letztere bestand entweder in guten Werken im Diesseits oder aber jenseitigem Leiden. Der Ablass sollte diese Bürde abmildern. Man konnte also eine Verkürzung der Zeit im Fegefeuer für Geld erwerben – tariflich klar geregelt, was die Verbreitung dieser Praxis noch förderte. Dies alles war weit entfernt von einer inneren christlichen Haltung, gar einer christlichen Umkehr, wie sie ursprünglich mit der Vorstellung von Buße verbunden war. Hier war Gottes Gnade im wörtlichen Sinn berechenbar, und diese Sichtweise wurde auf viele Gebiete übertragen: Wer fromme Werke nur wegen der Belohnung tat, wollte Gott vor allem als Geschäftspartner sehen.

Gegen eine solche Einstellung gab es schon im Mittelalter Vorbehalte; es existierte schließlich auch eine ganz andere, auf Innerlichkeit ausgerichtete Frömmigkeitskultur. Nachvollziehen lässt sich dies in vielen künstlerischen Darstellungen. Anhand von Bildern vom Schmerzensmann, von Christus mit den Wundmalen oder von Maria mit dem Leichnam ihres Sohnes auf dem Schoß konnte sich der Betrachter in Meditationen über das Leiden Christi versenken.

Noch tiefer drangen die vielen mystischen Autoren des späten Mittelalters in die Befindlichkeit der Menschen ein. Sie suchten nach dem Grund der Seele, nach dem göttlichen Funken in ihr. Der heute wohl bekannteste Vertreter der rheinischen Mystik, Meister Eckhart (um 1260–1328), wirkte vor allem über seine Schüler. Die Predigten des einflussreichsten unter ihnen, Johannes Tauler (um 1300–1361), wurden schon früh in Sammlungen zusammengefasst, angereichert mit denen anderer Autoren, nicht zuletzt solchen von Meister Eckhart selbst. 1498 und 1508 kamen diese in den Druck.

Ein Exemplar der Ausgabe von 1508 geriet auch in Martin Luthers Hände, und wir können noch heute die Bemerkungen lesen, die er als junger Mönch 1515 oder 1516 an den Rand gekritzelt hat – lateinische Notizen zu mittelhochdeutschen Texten. Hier können wir direkt nachvollziehen, wie die drei genannten Spannungen seine Arbeit und Gedankenwelt beeinflussten. Es ist, als würden wir ihm an seinem Schreibtisch über die Schulter schauen und das Werden seiner Theologie nicht im Gegensatz zur spätmittelalterlichen Frömmigkeit, sondern unmittelbar in deren Kontext beobachten.

Gerade das Thema der Buße interessierte Luther besonders. Johannes Tauler wies in einer Predigt seine Gemeinde an, wer ständig aufs neue sündige, der solle diese Sünden unmittelbar vor Gott tragen. Wenn man diese dann in der Beichte vergisst, schadet das nicht, so Tauler. Wichtig ist der direkte Gottesbezug. Es kommt nicht auf das sakramentale Geschehen der Beichte vor dem Priester an, sondern auf die ständige Rückkehr zu Gott. Damit stellte Tauler mindestens tendenziell den Beichtzwang in Frage. Als Martin Luther dies las, setzte er zwei Bemerkungen an den Rand: »überaus nützlicher Ratschlag« und »Merk dir das«.

In der Tat, er hat es sich gemerkt. Wenig später, am 31. Oktober 1517 nämlich, ließ er seine 95 Thesen gegen den Ablass mit einer Doppelthese beginnen, die Taulers Worte aufgriff: »1. Unser Herr und Meister Jesus Christus wollte,

**»Optime facit Papa, quod non potestate clavis (quam nullam habet) sed per modum suffragii, dat animabus remissionem«**

**Martin Luther, These 26**

als er sprach: ›Tut Buße‹ und so weiter, dass das ganze Leben der Gläubigen Buße sei. 2. Dieses Wort kann nicht in Bezug auf die sakramentale Buße (das heißt auf Beichte und Genugtuung, die durch das Priesteramt vollzogen wird) verstanden werden.« Damit brachte er die innerliche Frömmigkeit gegen die veräußerlichte Frömmigkeit und ihren Exponenten, den Ablass, in Stellung. Das war kein Bruch mit dem Mittelalter; auch Tauler und andere hatten solche Positionen vertreten. Aber in der pointierten Form, die Luther dieser Gegenüberstellung gab, bot sie reichlich Stoff zur Diskussion.

Vor allem hatte Luther einige Spitzen gegen überzogene päpstliche Ansprüche eingebaut – in für ihn erstaunlich eleganter Art. So lobte er in These 26 den Papst dafür, dass er für das Fegefeuer keine Schlüsselgewalt beanspruche, sondern hier lediglich verheiße, mit Hilfe der Fürbitte wirken zu können. Tatsächlich hatte Sixtus IV. (Papst 1471–1484) die Wirkung des päpstlichen Ablasses ins Fegefeuer hinein genau so erklärt; mancher Gelehrte setzte sich aber dafür ein, die Verheißungen für das Jenseits mit noch größerem Gewicht zu versehen, sie nicht allein als Fürbitte zu deklarieren, sondern dem Papst die rechtliche Bestimmungsgewalt zuzusprechen. Dem setzte Luther durch sein Lob geschickt Bedenken entgegen – unter Berufung auf Sixtus IV. selbst. Bei der Frage, warum der Papst eigentlich für einen so schätzbaren Grund wie Geld bereit sei, das Fegefeuer frei zu räumen und dies nicht einfach aus christlicher Nächstenliebe tue, ging er ebenfalls gewitzt vor: Er setzte sie (in These 39) in eine Reihe von möglichen Fragen der Laien, auf die es leider auch Gelehrten wie ihm schwerfalle, zu antworten. Hier

## Wider das Bapstum zu Rom vom Teuffel gestiftt/ Mart. Luther D.



Wittenberg/1545.  
durch Hans Lufft.

Im Rachen der Hölle wird der Papst mit der Tiara gekrönt. Die Titelillustration zu Luthers spätester und radikalster Kampfschrift gegen den Papst »Wider das Bapstum zu Rom vom Teuffel gestiftt« stammt aus der Werkstatt von Lucas Cranach dem Älteren (1472–1553).

fingierte Luther die fragenden Laien, um seine eigene Kritik möglichst gut zu verpacken.

Das konnte nicht gut gehen. Der Hoftheologe der Kurie, Silvester Prierias, wurde persönlich mit der Erstellung eines Gutachtens im Prozess gegen Luther beauftragt, und er legte den Finger genau in die Wunde der Infragestellung des Papstamtes. Erhalten ist nicht das Gutachten selbst, wohl aber ein »Dialog«, in dem Prierias die Thesen Luthers auseinandernimmt. Insgesamt verschiebt er die Debattenlage erheblich: Er setzt vier »Fundamente« voran, in denen es nicht um Buße geht, sondern um Kirche an sich. Vor allem das dritte ist scharf formuliert: »Wer sich nicht an die Lehre der römischen Kirche und des Papstes hält als die unfehlbare Glaubensregel, von der auch die Heilige Schrift ihre Kraft und ihre Autorität bezieht, ist ein Häretiker.«

Dabei hat die römisch-katholische Kirche die Unfehlbarkeit des Papstes erst viel später, im Jahr 1870, zum Dogma erhoben – und dies auch nur unter sehr einschränkenden Bedingungen. Prierias gehörte einer radikalen papalistischen Strömung an und hielt hier Luther eine Lehre entgegen, die man innerhalb der katholischen Kirche zwar vertreten konnte, aber nicht musste. Doch durch seine

Funktion am päpstlichen Hof hatte er eine Machtposition inne, die seine Aussagen verbindlich machte. Nun geriet in die Debatte über die Spannung aus Äußerlichkeit und Innerlichkeit auch die Frage nach Zentralität und Dezentralität hinein – ein besonders kritisches Gebiet, da an ihr die Macht des Papstes hing.

### Der Papst als der Antichrist

Luther muss dies hochgradig irritiert haben. Da hatte er auf der Grundlage akzeptierter spätmittelalterlicher Mystik die Menschen ermuntert, sich intensiver vor Gott zu stellen – und nun trat die Autorität der Kirche in einer aggressiven und bislang keineswegs konsensfähigen Weise dazwischen. Sein Erschrecken wuchs im Zuge der Auseinandersetzungen, als ihn auch andere mit ähnlichen papalistischen Ansprüchen konfrontierten. So ist zu erklären, dass er Ende 1519, rund zwei Jahre nach der Versendung seiner Thesen gegen den Ablass an zwei Bischöfe, zu einer radikalen Überzeugung kam: Der Papst selbst sei niemand anderer als der in der Offenbarung des Johannes für das Ende der Zeiten angekündigte Antichrist – und zwar nicht ein einzelner Amtsträger, sondern gleich das ganze Amt als solches.

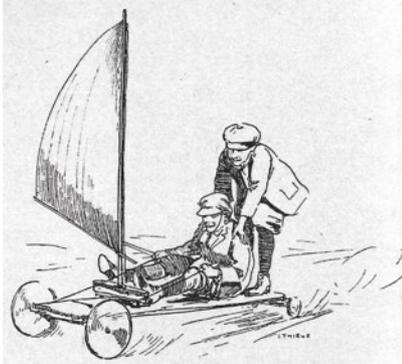
Eine friedliche Beilegung des Konflikts war damit nicht mehr möglich, und Luther hoffte nun vor allem auf die Fürsten. In einer großen Schrift an den »christlichen Adel deutscher Nation« im Jahr 1520 appellierte er an diesen, ein umfassendes Reformprogramm für Bildung und Kirche in die Wege zu leiten. Damit stellte er sich nicht nur auf die Seite einer dezentralen Leitung der Kirche, sondern legte auch dar, wie sich bislang die »Romanisten« gegen Änderungen verschanzt hätten: indem der Papst beansprucht habe, allein die Schrift auslegen und ein Konzil einberufen zu dürfen. Vor allem aber stehe entgegen der Behauptung der Kirche der geistliche Stand nicht über dem weltlichen. Und wenn dann die Inhaber des geistlichen Amtes auch noch versagten, gebe es nur eine angemessene Konsequenz. Dann dürften, ja müssten die Fürsten einschreiten und die Dinge in die Hand nehmen.

Dies war der Startschuss für eine Reformation in Städten und Territorien – aus Frömmigkeit und Theologie wurde Politik. Es kam zu einer großen Umwälzung, die schließlich im Augsburger Religionsfrieden bestätigt wurde und die religiöse Landschaft in Deutschland nachhaltig umpflügte. Die Wurzel dafür aber lag im Mittelalter selbst, in den latenten Spannungen, die es im 14. und 15. Jahrhundert immer stärker prägten. Luther und die Reformation knüpften an die Innerlichkeit im Gegenüber zur Äußerlichkeit an, sie betonten das Laienengagement im Gegensatz zur Dominanz der Kleriker, und sie favorisierten und gestalteten schließlich eine dezentral organisierte Form von Kirche. Im Licht dieser Vorgeschichte stellt sich die Reformation eben nicht als ein radikaler Bruch dar, sondern als Transformation von Spannungen, die bereits im Spätmittelalter angelegt waren. ◀

### QUELLE

Leppin, V.: Die fremde Reformation. Luthers mystische Wurzeln. C.H.Beck, München 2017

# 1917



Älter als gedacht: die Idee, auf dem Trockenen zu surfen.

Rollschuhen versehen ist. Mit dieser »Windmobile« soll der Junge 20 Meilen (32 km) in der Stunde zurücklegen können.« *Technische Monatshefte 9, S. 288*

## ALTÄGYPTISCHER SONNENGOTT

»Wir wußten oder glaubten zu wissen, daß Tell el-Amarna die aus dem Nichts hervorgerufene Schöpfung des merk-

## WINDIGE ERFINDUNG

»Ein Junge hat sich mit Hilfe eines ausrangierten Kinderwagens ein eigenartiges Fahrzeug hergestellt, das mit einem Segel, den Vorderrädern des Kinderwagens und hinten mit den Rädchen von

würdigsten aller Pharaonen war, jenes Amenophis IV., der mit der alten Religion seines Volkes brach, die Priester der alten Götter unterdrückte und aus königlicher Machtvollkommenheit den Kultus des einen wahren Gottes, der Sonne, einführte.

Auch die äußere Gestalt des merkwürdigen Mannes lernten wir genauer kennen, eine Gestalt fast unter Mittelgröße, schlank und mager, aber mit Hängebauch, langem Hals, vor allem aber mit merkwürdig hohem Schädel von der Art, die der heutige Mediziner Turmschädel nennt.«

*Die Umschau 40, S. 739*

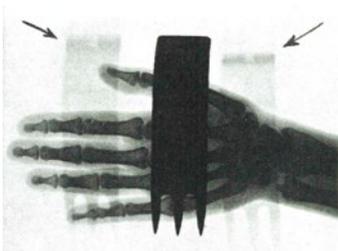
## BASTGEWINNUNG IN RUSSLAND

»Die Lindenbäume, die den Bast abgeben sollen, werden entweder gefällt oder nur einseitig der Rinde entkleidet. Im Frühling, wenn das Holz in Saft kommt, gehen die Förster in die Lindenwälder, suchen die dicksten Bäume aus und reißen ringförmige Einschnitte in die Stämme. Die Rinde wird, je eher desto besser, in Tümpel gebracht. Dort bleibt sie je nach der Wärme 6 Wochen bis 3 Monate unter Wasser liegen.

Ist [die] Stufe der Fäulnis erreicht, so werden die Rindenstücke aus dem Wasser gehoben, ausgebreitet und der Bast in langen Bändern von verschiedener Breite abgezogen. Aus 15 kg Rinde, die einer jungen Linde entnommen werden dürfen, enthält man etwa 6 bis 7 kg Bast.«

*Kosmos 9, S. 245*

# 1967



Anders als Metall (Mitte) stört Plastik (Pfeile) das Röntgenbild nicht.

»Neuartige Kunststoff-Operationsbestecke aus Ultramid, einem sehr zähen und sterilisierbaren Kunststoff, werden gegenwärtig in den Städtischen Krankenhäusern Mannheim erprobt. Die Besteckteile sind Röntgenstrahlen-durchlässig und werfen, im Gegensatz zu herkömmlichen Metallinstrumenten, auf dem Röntgenschirm nur einen schwachen Schatten (Pfeile). Dadurch erhöht sich nicht nur die diagnostische und operative Sicherheit. Es wird auch in Fällen, bei denen bisher Metallinstrumente für die Röntgenaufnahme entfernt werden mußten, wertvolle Operationszeit eingespart.« *Kosmos 10, S. \*282*

## OP-BESTECK ZUM RÖNTGEN

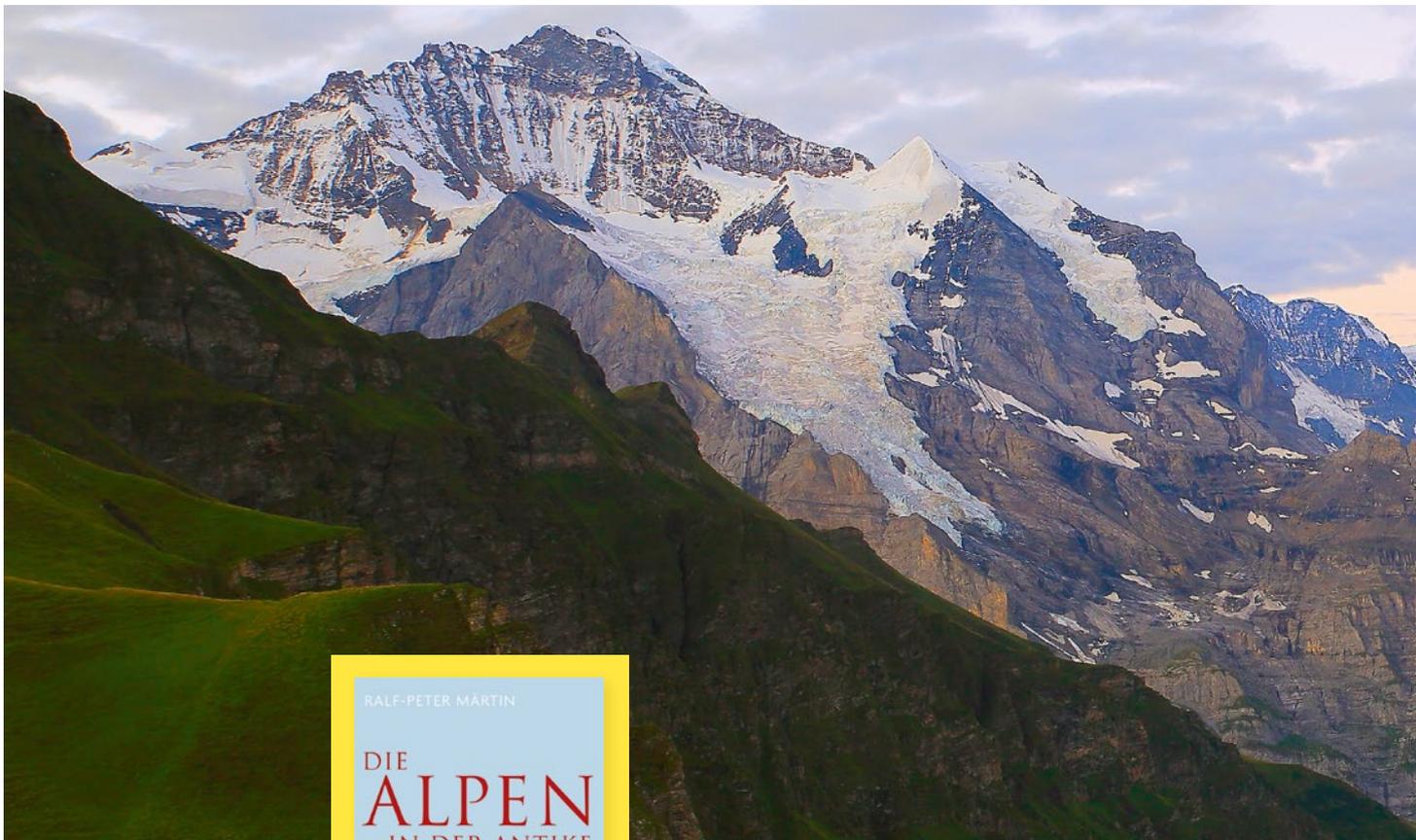
## HÜTTE AUF DEM MOND

»Gelatinehütten sollen sich auf dem Mond gelandete Astronauten errichten. Die aus Fiberglastuch vorgefertigten und mit Gelatine imprägnierten Hütten werden zusammengefasst in luftdichte Behälter eingeschlossen. Auf dem Mond auseinandergezogen härten die Hüttenwände sofort aus, weil das Wasser aus der Gelatine im Weltraumvakuum verdampft. Die fertigen Hütten sind sehr robust, aber äußerst leicht.« *Kosmos 10, S. \*305*

## TASTENDER ELEKTRONENSTRAHL

»Ein Raster-Elektronenmikroskop erzeugt Oberflächenabbildungen auf Grund der unterschiedlichen Sekundärelektronenemission der Probe, die auftritt, wenn ein feingebündelter Elektronenstrahl die Präparatoberfläche abtastet, ähnlich wie ein Fernsehrastrer. (Beim gewöhnlichen Elektronenmikroskop hingegen erfolgt die Abbildung des Objekts direkt durch das Linsensystem). Die erreichbare Tiefenschärfe der Bilder ist größer als beim gewöhnlichen Elektronenmikroskop. Das Präparat kann direkt, ohne vorhergehende Behandlung, beobachtet werden.«

*Naturwissenschaftliche Rundschau 9, S. 390*

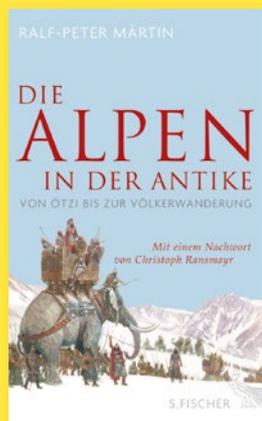


AGUSTAVOP / GETTY IMAGES / ISTOCK

## GESCHICHTE GEBIRGE MIT VERGANGENHEIT

Seit Jahrtausenden bewohnen und durchqueren Menschen die Alpen. Dieses Buch folgt ihren Spuren von der Eiszeit bis zur Christianisierung.

Wanderer und Mountainbiker zieht es im September in die Alpen, denn der Monat lockt mit warmen Tagen und einer oft grandiosen Fernsicht. Wer am Abend nach der Bergtour geistige Erbauung wünscht, dem sei dieser recht stramme Marsch durch die Geschichte empfohlen. Unterhaltsam und spannend erzählt der Publizist und Althistoriker



Ralf-Peter Martin  
**DIE ALPEN IN DER ANTIKE**  
Von Ötzi bis zur Völkerwanderung  
S. Fischer, Frankfurt am Main 2017  
208 S., € 22,-

Ralf-Peter Martin, was sich vor Jahrhunderten im Alpenraum zugetragen hat.

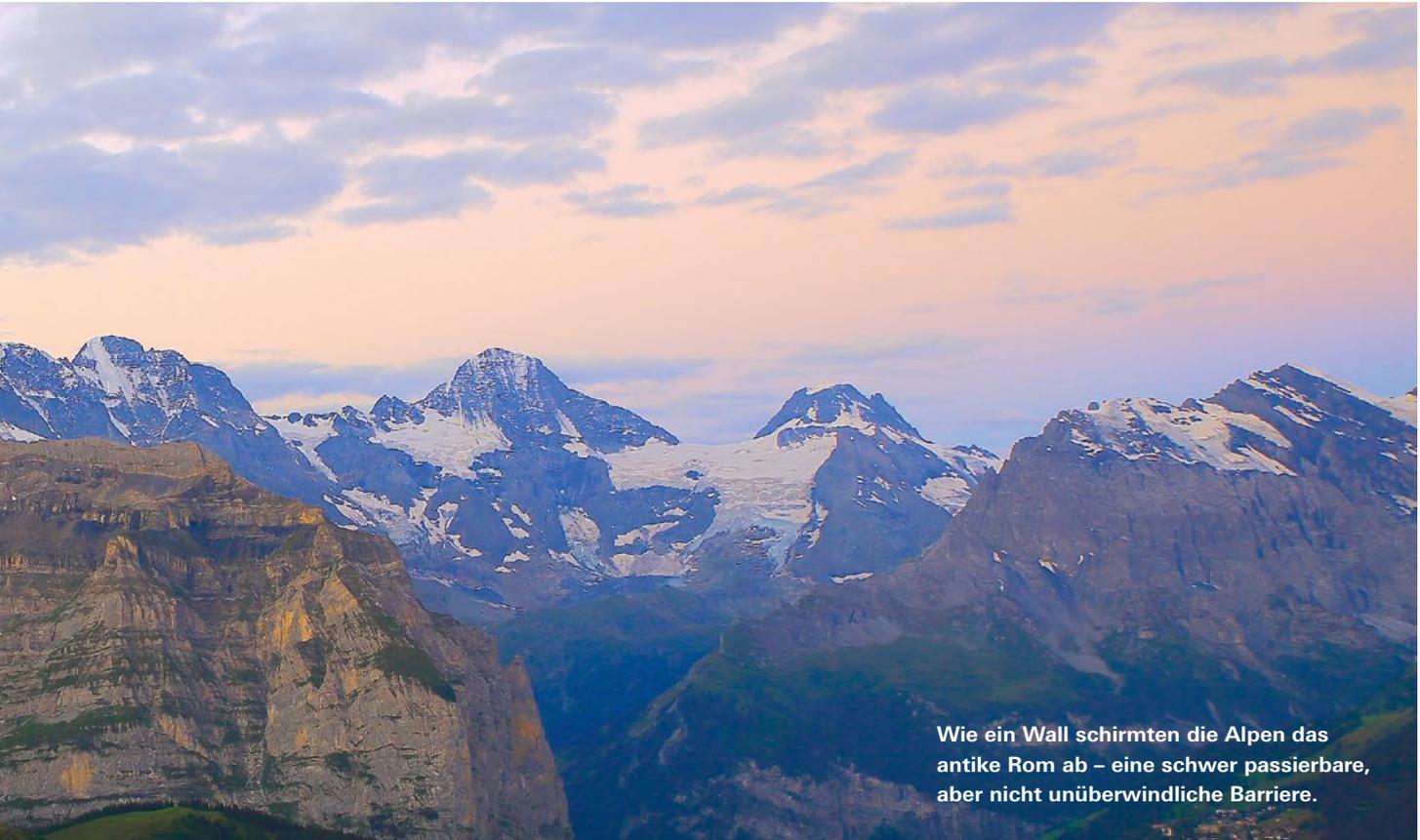
Martin erweitert den Zeithorizont seines Buchs über die Antike hinaus in die letzte Kaltzeit, die fruchtbare Talböden hinterließ; er geht auf die ersten Jäger ein, die sich um 13000 v. Chr. ins Gebirge trauten; und er verweilt bei dem heute berühmtesten Vertreter bäuerlicher Dorf-

gemeinschaften des frühen 4. Jahrtausends v. Chr.: Ötzi. Erstaunlich, was Naturwissenschaftler bereits über den Gletschermann herausgefunden haben – etwa, was er wann gegessen hatte, an welchen Krankheiten er litt und mit welcher Kleidung er den Unilden des Hochgebirges trotzte. Und wie er möglicherweise starb. Wurde Ötzi von seinen eigenen Leuten den Göttern geopfert?

Mit dem Jahr 2000 v. Chr. geht der Autor dann langsam zur Antike über und nimmt gleichzeitig den Mittelmeerraum in den Blick. Die Angehörigen der damaligen Eliten verlangten allerorten nach Bronze, der Kupferbergbau in den Alpen boomte, außerdem gab es dort Salz, Blei, Silber, Gold, Eisen. Fernhan-

delswege über die Pässe etablierten sich, um die Hochkulturen der Zeit zu beliefern und deren Erzeugnisse zu den frühen Kelten zu bringen.

Schon früh verknüpfte sich die Geschichte der Alpen mit Rom, das der Antike seinen Stempel aufprägte. Mochten die schroffen Gebirge auch ein Hindernis darstellen, verliehen sie der Stadt doch keinen verlässlichen Schutz gegen Invasoren. Keltische Stämme hatten die Berge bezwungen, sich in Norditalien niedergelassen – und 387 v. Chr. die Stadt am Tiber geplündert. Hannibal (247–183 v. Chr.) führte das karthagische Heer samt Kriegselefanten 218 v. Chr. über die Alpen, kein Jahrhundert später fielen Kimbern, Teutonen und andere



Wie ein Wall schirmten die Alpen das antike Rom ab – eine schwer passierbare, aber nicht unüberwindliche Barriere.

AGUSTAVOP / GETTY IMAGES / ISTOCK

Stämme in Italien ein. Die Konsequenz: Rom kehrte den Spieß um und schickte seine Legionen gen Norden. Gaius Julius Cäsar (100–44 v. Chr.) profilierte sich dabei als erfolgreicher Feldherr, Augustus (63 v. Chr.–14 n. Chr.) machte die Unterwerfung der Alpenstämme zur Chefsache und schickte 15 v. Chr. seine Stiefsöhne Tiberius und Drusus aus.

Auf die Eroberung folgte die Romanisierung: Die großen Pässe wurden mit Straßen befestigt, Städte gegründet, die Geldwirtschaft eingeführt. In geeigneten Lagen baute man Wein an, Esskastanien wuchsen am Südrand der Gebirgskette. Binnen weniger Jahrzehnte, so Märtin, war aus einer unruhigen Region eine Transitzone geworden, von der alle

profitierten. Die heute noch lebendigen Sprachen Furlan, Ladinisch und Rätoromanisch, aus einheimischen und dem Lateinischen entstanden, legen ein bebildertes Zeugnis der Akkulturation ab.

Doch Frieden und Wohlstand herrschten nur zwei Jahrhunderte, dann geriet das Imperium in den Strudel der Völkerwanderungen, und die guten Straßen durch den Alpenraum zeigten ihre nachteilige Seite – Markomannen, Alamannen, Hunnen und andere wussten sie zu nutzen. Während feindliche Großverbände die Grenzen überwand, destabilisierten Soldatenkaiser das Reich im Innern. Kaiser Diokletian (um 240–312) reformierte das Heer und teilte seine Macht, um die

vielen Brandherde des Imperiums effektiver löschen zu können.

Letztlich war der Niedergang römischer Herrschaft im Westteil des Imperiums zwar nicht aufzuhalten, dennoch blühte die romanische Kultur weiter. Auch dort, wo die neuen germanischen Herren romanisiertes Land dauerhaft übernahmen, verschwand die römische Kultur nicht.

Abschließend betrachtet der Autor die Ausbreitung des Christentums im Alpenraum, etwa die Gründung von Klöstern. Was machte diese Religion überhaupt so attraktiv? Schließlich hatten die Bergvölker ihre eigenen Gottheiten, die sie mit beeindruckenden Gipfeln und Plätzen verbanden; hinzu kamen die römischen Kulte. Doch nur das Chris-

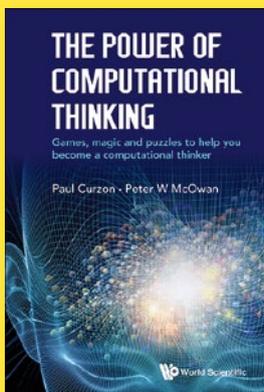
tentum versprach ein Paradies, das nicht durch heroische Taten, sondern allein durch den Glauben erschlossen würde. Und das jedermann und jederfrau offen stand.

Gern hätte Märtin, der begeisterter Bergwanderer war, seine Alpengeschichte bis in die Gegenwart fortgeführt. Doch wie dem Nachwort des Schriftstellers Christoph Ransmayr zu entnehmen ist, erforderte schon dieses Buch viel Kraft. 2015 erhielt der Autor die Diagnose ALS, eine fortschreitende Lähmung der Muskulatur setzte ein. Märtin starb im Jahr darauf, wenige Tage nach Beendigung des Manuskripts.

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

## INFORMATIK PROZEDURALES DENKEN

»Computational Thinking« subsumiert Fähigkeiten, die beim Programmieren hilfreich sind – aber nicht nur dort.



Paul Curzon, Peter W. McOwan  
**THE POWER OF COMPUTATIONAL THINKING**  
Games, magic and puzzles to help you become a computational thinker  
World Scientific Publishing  
Europe, London 2017  
220 S., € 23,99

Zerlege eine Aufgabe in elementare Einzelschritte und bringe sie in die richtige Reihenfolge. Mache daraus eine Anweisung (einen »Algorithmus«), die ohne Sinn und Verstand ausführbar ist und stets zum richtigen Ergebnis führt. Vergewissere dich, dass die Anweisung jeden möglichen Sonderfall abdeckt. Bei den – vielleicht zahlreichen – Gegenständen, die du zu bearbeiten hast, überlege dir, auf welche ihrer Eigenschaften es ankommt und welche du ignorieren kannst. Abstrahiere so sehr, dass von dem Problem nur die nackte

Struktur übrig bleibt, und versuche diese an anderer Stelle wiederzufinden. Finde die sparsamste Beschreibung des jeweiligen Gegenstands.

Das und einiges mehr fällt unter die Kompetenzen, die Paul Curzon und Peter McOwan unter dem Begriff »Computational Thinking« zusammenfassen. Deutsche, allerdings weniger umfassende Entsprechungen wären »algorithmisches« oder »prozedurales« Denken. Streng genommen braucht man keinen Computer, um diese Tugenden auszuleben, aber es ist schon richtig: Auch ich bin damit in voller Schärfe erst konfrontiert worden, als ich meine ersten Programme in Fortran zu schreiben hatte, jener ertümligen Programmiersprache, die zwar im Hochleistungsrechnen bis heute fortlebt, die aber gewöhnliche Computernutzer nur noch in eigens dafür hergerichteten Gehegen zu sehen bekommen.

Und die Erfahrung prägt fürs Leben! Sie beeinflusst mein Verhalten auch außerhalb des Computers, bin hin zum Wäschezusammenlegen. Wenn ich die Nutzung des knappen Speichermediums Tisch nicht optimiere, fehlt mir im entscheidenden Moment der wahlfreie Zugriff (»random access«) auf die ungepaarten Socken.

Peter und Paul, wie die Autoren sich selbst zu nennen pflegen, zählen zum Thema auch den Umgang des Computers mit nicht computergemäßem menschlichem Verhalten. Warum rücken die Geldautomaten immer zuerst die Karte und dann

das Geld heraus? Weil der Mensch den Zweck (das Geld einzustecken) höher bewertet als das Mittel (die Karte) und daher dazu neigt, Letztere stecken zu lassen.

Das Buch ist aus Kursen hervorgegangen, die Peter und Paul viele Jahre lang für Schüler gehalten haben. Man muss ihnen daher nachsehen, dass sie ihren Lesern Schlüsselbegriffe wie »generalisation« und »abstraction« immer wieder im Fettdruck einhämmern und ein bisschen zu häufig betonen, dass »Computational Thinking« der Karriere förderlich ist. Dafür sind die Beispiele vorbildlich sauber ausgearbeitet.

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

## BOTANIK GRÜNE TRICKS

Von Betrügern bis Trittbrettfahrern hat die Welt der Gewächse alles zu bieten.



Bruno P. Kremer  
**88 VERBLÜFFENDE PFLANZEN**  
Die erstaunlichsten Kniffe unserer Blumen, Sträucher und Bäume  
Ulmer, Stuttgart 2017  
192 S., € 19,90

Pflanzen sind viel spannender, als Sie denken: Das ist das Kredo des erfolgreichen Sach- und Lehrbuchautors Bruno P. Kremer, der bekannt ist für seine unnachahmliche Art, Sachverhalte ansprechend zu vermitteln. Diesmal befasst sich der promovierte Biologe mit dem Wurzelwerk ausgewählter Bäume und Blütenpflanzen und weiß Erstaunliches von Blattstängeln sowie Besonderes über Blätter zu berichten.

Kremer stellt ungewöhnliche und spektakuläre Facetten von ausschließlich heimischen Arten vor, die ziemlich häufig sind und daher auch Nichtbotanikern bekannt sein dürften. Dabei pflegt der Autor einen äußerst vergnüglichen Ton. Nehmen wir zum Beispiel die Wurzeln: Die meisten Pflanzen haben welche, manche wie die winzige Zwerglinse aber auch nicht. Viele harmlos wirkende Blütenpflanzen, darunter einige der allseits beliebten Orchideen, nutzen ihre Wurzeln, um bei benachbarten Wiesenkräutern und Gräsern unterirdisch »abzukassieren«. Der einfache Wiesenklee dagegen kultiviert in seinen Feinwurzeln zahlreiche Bakterien, die ihn mit lebenswichtigem Stickstoff aus der Luft versorgen. Und die Mistel zapft mit Hilfe besonderer Wurzelsenker aus ihrem Wirtsbaum sowohl Wasser als auch Mineralstoffe und baut ansonsten darauf, ein Leben lang mit ihm verwurzelt zu sein.

Anhand der gewöhnlichsten Fichte (*Picea abies*) erklärt Kremer eindrucksvoll die enge Lebensgemeinschaft, die Waldbäume zum

beiderseitigen Nutzen mit Bodenpilzen eingehen. Der Spitzahorn (*Acer platanoides*) produziert »extrem bunten Abfall« (gemeint ist das Laub) und das Scharbockskraut (*Ficaria verna*) vermehrt sich »ohne Blümchensex« (also rein vegetativ). Diese Beispiele aus dem Text zeigen: Der Biologe unterhält gern und amüsiert immer wieder mit griffigen Formulierungen aus dem Alltagsleben; schon die immerhin 88 Untertitel zu den einzelnen Pflanzen verraten viel Humor. Quasi nebenbei erhalten die Leser

## Kremer macht den Einstieg in die Pflanzenwelt zu einem großen Vergnügen

eine gehörige Portion biologisches Grundwissen, ohne gleich durch Fachbegriffe wie Symbiose, Mykorrhiza oder Parasitismus überfordert oder gar abgeschreckt zu werden.

Blüten sind für Kremer der visuelle Höhepunkt im Leben einer Pflanze. Besonders aufregend: Ihre Interaktionen mit tierischen Besuchern. Beim Aronstab kommt es zum »Kidnapping in der Kesselfalle«, der Besenginster gehört wegen seiner laut aufplatzenden Hülsenfrüchte zu den »Fighting Flowers« und der Rote Fingerhut ist ein pflanzlicher Hochstapler, da er durch sein äußeres Erscheinungsbild üppige Pollenmengen verspricht, aber kaum etwas zu bieten hat.

Aus Blüten werden Samen und Früchte. Auch hierzu kann der Autor im letzten Kapitel viel Überraschendes berichten. Vor allem die Verbreitung mancher Samen hat es ihm

angetan. So verführt das Schöllkraut durch ein nahrhaftes Ölkörperchen bestimmte Ameisenarten dazu, die schwarz glänzenden Samen als Proviant anzusehen und so überallhin zu tragen. Springkräuter dagegen verlassen sich bei der Verteilung nicht auf tierische Helfer. Als »pflanzliche Artillerie« verschießen sie die Samen lieber selbst mit Hilfe eines ausgeklügelten Mechanismus in ihren Samenkapseln.

Letztlich geht es um verschiedene Strategien, sich an Umweltfaktoren

und Ressourcenverfügbarkeit anzupassen, um ein Überleben zu sichern. Die Strategien der Natur sind so unterschiedlich wie erstaunlich, ganz nach dem Motto »Das Leben findet immer einen Weg«.

Kremer macht den Einstieg in die Pflanzenwelt vor unserer Haustür zu einem großen Vergnügen. Als Hochschullehrer und Didaktiker versteht er es, das Werk gut zu strukturieren. Indem er die Hauptkapitel nach den pflanzlichen Grundorganen Wurzel, Stängel, Blatt, Blüte sowie Früchte mit Samen gliedert, vermeidet er den Eindruck einer beliebigen Aneinanderreihung von Kuriositäten. Das gut gebildete Buch ist leicht verständlich, kurzweilig geschrieben, äußerst interessant und immer wieder verblüffend.

Susanne Hufmann ist Biologin und arbeitet bei der Gesellschaft für Naturschutz und Auenentwicklung (GNA) in Rodenbach.

## MEDIZIN WO ÄRZTE ALS DETEKTIVE WALTEN

Die Medizinerin Anika Geisler präsentiert 80 kaum zu glaubende Patientengeschichten.

Seit 2013 präsentiert die Zeitschrift »Stern« eine Rubrik namens »Die Diagnose« mit mysteriösen Krankengeschichten, die beinahe kriminalistischen Spürsinn erforderten, um aufgeklärt zu werden. Medizinerin Anika Geisler, seit 2000 als Redakteurin bei der Zeitschrift angestellt, hat die 80 spektakulärsten Fälle ausgesucht und in diesem Taschenbuch zusammengestellt.

Die Geschichten sind alle ähnlich aufgebaut. Meist geht es um Patienten mit längerer Krankengeschichte, denen zuvor keiner helfen konnte und die jetzt bei einem Arzt in Behandlung sind, der ihre zahlreichen Befunde wie ein Puzzle zusammenfügen muss. Manchmal ist es nur ein Zufall, der ihn auf die richtige Spur bringt. Für die Patienten ist die korrekte

## Nach dem Verzehr koffeinhaltiger Kaugummis wurde der Junge aggressiv

Diagnose wie eine Erlösung, auch wenn die Therapie jetzt erst richtig losgeht.

Mitunter handelt es sich um dramatische Verläufe, bei denen nur die zündende Idee des Arztes den Betroffenen das Leben rettete. Wenn ein Stück Luftballon die Luftröhre eines Kindes



Anika Geisler (Hg.)

### DIE DIAGNOSE

Wenn Ärzte zu Detektiven werden – rätselhafte Krankheiten und ihre Ursachen  
Penguin, München 2017  
256 S., € 10,-

verlegt, wenn hinter scheinbar psychisch bedingten Panikattacken eine Lungenembolie steckt oder wenn Bakterien in rasendem Tempo das Bindegewebe eines Beins »auffressen«, ist sofortiges und richtiges Handeln erforderlich.

Amüsant dagegen wirken die Geschichten von einer versteinerten Schlange im Magen oder einem mit Bier gefüllten Kondom im Dünndarm. Letzteres ließ sich sogar ohne Opera-

tion beheben. Dass zu viel Koffein schaden kann, ist eigentlich allgemein bekannt – dass aber ein Junge plötzlich aggressiv wird und ohne Punkt und Komma sinnloses Zeug daherredet, weil er mehrere Packungen koffeinhaltige Kaugummis verzehrt hat, auf die Idee

muss man erst einmal kommen.

Ebenso schwer vorstellbar erscheint es, dass manche Menschen zwei bis drei Packungen Lakritz pro Tag essen oder acht bis zehn Liter Cola trinken, damit sie nachts auf Kängurujagd gehen können. Da muss der Arzt schon die richtigen Fragen stellen, um die Ursache für einen bedrohlichen Kaliummangel zu finden. Von allein berichten die Patienten jedenfalls nicht von solchen merkwürdigen Angewohnheiten, da sie sie ja in der Regel nicht für seltsam, geschweige denn krankheitsrelevant halten.

Die eine oder andere Episode stimmt auch nachdenklich. Ein Mann, der jahrelang unter Migräne litt und dem Internisten, Orthopäden, Neurologen und Schmerztherapeuten nicht helfen konnten, ging eines Tages wegen Niesattacken

lich unerhebliche Kleinigkeit bei ihm entdeckte, ernst nahm und richtig behandelte.

Von einem guten Arzt erwartet man, dass er Symptome und Befunde immer richtig kombiniert. Aber manchmal gehört auch ein wenig Glück und Spürsinn dazu, um dem Patienten helfen zu können. In diesem Buch gehen jedenfalls alle Geschichten gut aus, zum Schluss »strahlen die Patienten immer vor Freude«. Wer aber genauer darüber nachdenkt, kann erahnen, welch lange Leidenswege oft vor, aber auch nach der richtigen Diagnose liegen.

Die Episoden sind leicht zu lesen und spannend geschrieben. Mancher Leser mag sich dazu animiert fühlen, vielleicht doch noch mal zu einem Arzt zu gehen mit den Beschwerden, die bisher nicht recht erklärbar

## Die Ärztin entdeckte einen kleinen Knochensporn und schöpfte Verdacht

und eines Fließschnupfens zum HNO-Arzt. Die Ärztin entdeckte zufällig einen kleinen Knochensporn an der Nasenscheidewand und brachte ihn mit den Kopfschmerzen in Verbindung. So etwas sei zwar sehr selten, argumentierte sie, könne aber vorkommen. Tatsächlich waren und blieben die Kopfschmerzen verschwunden, nachdem der Sporn operativ entfernt worden war. Dieser Patient, den jahrelang höllische Kopfschmerzen plagten, dem medizinische Experten nicht helfen konnten, hatte am Ende also einfach Glück, dass jemand eine vermeint-

waren. Eine kleine Warnung an Hypochonder: Man bekommt beim Lesen leicht das Gefühl, selbst an einer kryptischen, höchst seltenen Krankheit zu leiden. Der Band ist nicht nur für medizinische Laien, sondern auch für Mediziner sehr lesenswert. Er erinnert selbst den routiniertesten Kliniker daran, dass es eigentlich nichts gibt, was es nicht gibt, und dass auch höchst seltene Krankheiten tatsächlich vorkommen.

Tanja Neuvians hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg bei Heidelberg.

## RAUMFAHRT EXTRATERRESTRISCHE HÖHLEN- BEWOHNER

**Ein Physiker beschreibt, wie die Menschheit eine dauerhafte Basis auf dem Mond einrichten kann.**

► Zurück zum Mond? Diesmal aber bitte nicht, wie zur Apollo-Ära, nur für ein paar Fahnen auf dem Erdtrabanten und Museumsstücke hier und da – sondern, um dort eine nachhaltige Siedlung aufzubauen. In diesem Buch zeigt der Physiker Florian M. Nebel, dass das nicht nur technisch machbar ist, sondern auch finanzierbar. Die Kosten, berechnet er, dürften zwischen 70 und 275 Milliarden Euro liegen. Verteilt auf zwei Jahrzehnte, wäre das für die meisten Staaten und auch manchen Großkonzern erschwinglich, und nach Ablauf dieser Zeitspanne würde die Siedlung laut Nebel ihren Unterhalt sogar selbst erwirtschaften. Sie könnte zum Beispiel Aluminium und flüssigen Sauerstoff bereitstellen und – im Hinblick auf eine bemannte Erkundung des Weltalls – zum wichtigsten Treibstofflieferanten eines lunaren Weltraumbahnhofs werden.

Doch der Reihe nach. Der Autor beginnt mit einer allgemein verständlichen historischen Einführung in die Raumfahrt, gefolgt von der Frage, warum wir den Mond überhaupt besiedeln sollten. Anschließend gibt er interessante Einblicke in verschiedene Aspekte des Erdtrabanten und bisheriger Missionen dorthin.



Florian M. Nebel  
**DIE BESIEDLUNG DES  
MONDES**

Technisch machbar. Finanziell profitabel. Logisch sinnvoll.  
LV-Buch, Münster-Hiltrup 2017  
**160 S., € 19,95**

Im Folgenden wird es technisch, wenn der Autor aktuelle Raketen, Raumschiffe und die Module der Internationalen Raumstation (ISS) vorstellt. Wer sich vor allem für den Blick in die Zukunft interessiert und schon einen groben Überblick über den aktuellen Stand der Raumfahrt hat, kann diese Teile getrost überspringen.

Nach einem kurzen Zwischenstopp im Erdbit geht Nebel dann endlich zum Mond über. Er betrachtet mehrere Alternativen, dorthin zu reisen, um sich schließlich einer Variante mit einer Minimalversion des Sojus-Raumschiffs zu widmen. Einmal gelandet könnten ausgediente Tanks zu Wohnmodulen umfunktioniert werden – einer von vielen Wegen, um die Startmasse des Raumschiffs gering zu halten. Für die Landung selbst weist der Physiker darauf hin, dass eine wiederverwendbare Landefähre nötig sei: Die »Phönix« getaufte Fähre bringe die Siedler nicht nur vom Mondorbit zur Oberfläche und zurück, sondern solle auch dazu dienen, größere Entfernungen auf dem Himmels-

körper zurückzulegen. Denn gerade die ersten Landungen auf dem Mond seien vor allem für das Erkunden wichtig, bei dem die Astronauten vorher ausgewählte Kandidaten für den Standort der Siedlung genauer auf ihre Eignung prüfen.

Wenn der Autor nun einige dieser möglichen Standorte vorstellt, stößt er zum eigentlichen Herzstück seines Werks vor. Man merkt, dass ihm dieser Abschnitt am wichtigsten war, denn es finden sich kaum noch Tipp- und Grammatikfehler und der Text liest sich insgesamt flüssiger als die »Randkapitel«. Außerdem nimmt die Dichte an Zahlen und Tabellen deutlich zu – sicher für jene Leser relevant, die

zu transportierende Massen und Kostenrechnungen nachvollziehen wollen.

Das Siedlungskonzept selbst ist überzeugend und schnell erklärt: Die ersten Wohnmodule werden noch ober-»irdisch« stehen, und die ersten Siedlungstrupps setzen sich neben Astronauten vor allem aus Geologen und Bergmännern zusammen. Deren Aufgabe ist es, so schnell wie möglich einen Wohnstollen in eine Berg- oder Kraterwand zu treiben, damit die Siedlung zügig in die Unterwelt verlegt werden kann, wo sie vor Weltraumstrahlung geschützt ist.

Aus dem abgebauten Gestein lassen sich wertvolle Rohstoffe wie Aluminiumoxid gewinnen, das

die Siedler zu Aluminium und Sauerstoff verarbeiten können. Mit dem Aluminium könnte man im schwachen Schwerfeld des Mondes größere Raum-

## Die Mondbesiedlung ist für den Autor nur ein Schritt auf dem Weg ins All

schiffe bauen als auf der Erde, und der Sauerstoff könnte in flüssiger Form dazu dienen, am lunaren Weltraumbahnhof andockende Raumschiffe aufzutanken. Spätestens hier wird deutlich: Die Besiedlung des Himmelskörpers ist für Nebel kein Selbstzweck, sondern der nächste Schritt der Menschheit auf

dem Weg in die Weiten des Weltalls.

Der Schwerpunkt des Buchs liegt klar auf Technik und Bergbau in einer möglichen Mondsiedlung;

andere Aspekte eines solchen Vorhabens (Freizeit, Nahrung, Grünpflanzen, medizinische Versorgung et cetera) werden, wenn überhaupt, nur kurz angesprochen. Insofern ist der Klappentext etwas irreführend, der mit Familien, Kindern und Gemüsegärten beginnt und erst dann auf Fertigungshallen und Produktionsanlagen zu sprechen kommt. Hier zeigt sich die wohl größte Schwäche des Werks: Es macht nicht so recht deutlich, wen es eigentlich ansprechen will. Viele Grafiken und detaillierte Tabellen deuten in Richtung Lehrbuch, dagegen sprechen jedoch fehlende Querverweise und Register.

Nichtsdestoweniger zeichnet Nebel ein aufschlussreiches Bild davon, wie eine dauerhafte Mondbasis aussehen könnte. Sein Konzept überzeugt, und der Band wird am Ende durch einige Ideen zur Finanzierung abgerundet. Nach der Lektüre jedenfalls wirkt der selbstbewusste Buchtitel (»Die Besiedlung des Mondes – Technisch machbar. Finanziell profitabel. Logisch sinnvoll.«) alles andere als vollmundig.

Christiane Heinicke ist Physikerin, hat selbst ein Jahr lang in einer simulierten Marsstation gelebt und bloggt auf »SciLogs«.



Axel Bojanowski  
**WETTER MACHT LIEBE**  
Wie Wind und Wolken unsere Gefühle verändern und andere rätselhafte Phänomene der Erde  
DVA, München 2017  
224 S., € 14,99

## GEOWISSENSCHAFT GESCHICHTEN, DIE DIE ERDE SCHREIBT

Von leuchtenden Nachtwolken, planetaren Eigenheiten und dem Atem der Vulkane.

▶ Nach »Die Erde hat ein Leck« (2014) und »Nach zwei Tagen Regen folgt Montag« (2012) hat der Geologe und Wissenschaftsjournalist Axel Bojanowski in seinem aktuellen Buch erneut eine Reihe spannender geowissenschaftlicher Geschichten zusammengetragen. In 50 kurzen Kapiteln erzählt er beispielsweise von der Erkundung leuchtender Nachtwolken, dem Trockenfallen des Mittelmeers vor sechs Millionen Jahren oder der Erforschung von Erdbeben und Vulkanen. Wer schon einmal etwas von dem Autor gelesen hat, wird nicht überrascht sein. Da wird, der Dramatik halber, Magma zu den »zähflüssigen Eingeweiden der Erde«, und Vulkane haben einen »unheimlichen Atem«.

Das ist zum Teil recht reißerisch, auch in diesem Buch. Aber man muss Bojanowski zugestehen: Er weiß, wie man Geschichten fesselnd erzählen kann, und stellt die Fakten verständlich, spannend und korrekt dar. Die meisten Kapitel hat er in einen aktuellen Bezug gesetzt und stützt sich häufig auf neuere Originalveröffentlichungen, die am Ende des Buchs aufgelistet sind. So bleibt den Lesern die Möglichkeit, sich bei Interesse dort etwas tiefschürfender zu informieren. Tim Haarmann

## ABRECHNUNG MIT DER INFLATIONSTHEORIE

**Mehrere Kosmologen bemängeln, das gängige Modell einer rapiden Aufblähung des Alls nach dem Urknall hätte infolge zahlreicher Modifikationen inzwischen jedwede Erklärungskraft verloren (»Inflationsmodell in der Kritik«, Spektrum Juni 2017, S. 12)**

**Johann Felix Guilino, München:** Die Abrechnung mit der kosmischen Inflation erinnert mich an Professor Lee Smolins verheerende Bilanz der Stringtheorie, die er in seinem brillanten 500-Seiten-Buch »The Trouble With

Physics« (deutsch: »Die Zukunft der Physik«) zusammenträgt. Smolins Fazit: Die Stringtheorie lässt sich praktisch jeder beliebigen Welt anpassen; sie sagt alles und nichts voraus, entzieht sich aber bis heute jedem empirischen Test. Statt die zunehmende Aussichtslosigkeit einzusehen und zu einer orthodoxen, durch Experimente abgesicherten Physik

zurückzukehren, versteigen sich die Jünger dieser Dogmatik zu immer abenteuerlicheren Vorstellungen – und reiten unbeirrbar ein totes Pferd! Kein Wunder: Wer gesteht sich schon gern ein, sein ganzes Forscherleben für die Ablage P gerackert zu haben?

Folge des Artikels für mich: Die Vorstellung vom Multiversum erscheint weniger aussichtsreich; vielleicht stimmt doch die komplementäre Vorstellung eines »atmenden« Universums. Auf jeden Fall brauchen wir weiter eine Theorie, die elegant erklärt, wieso unser Universum so unglaublich genau darauf abgestimmt zu sein scheint, menschliches Leben zu ermöglichen.

**Gerhard Weiland, Köln:** Die in dem Artikel dargelegten Schwierigkeiten finde ich sehr interessant. Als Laie habe ich allerdings keine Möglichkeit, zu entscheiden, welche Theorie nun die vielversprechendere ist. Was ich aber sehr wohl feststellen kann, ist, dass mir der teilweise sehr rüde Tonfall der Autoren gehörig gegen den Strich geht. Ein »flugs zurechtgeflücktes Szenario« und ähnliche Ausfälle sind eines Diskurses unter Wissenschaftlern unwürdig. Es ist schon schlimm genug, dass in vielen Bereichen des Lebens Anstand und Höflichkeit verschwinden. Die Wissenschaft sollte sich dem nicht auch noch anpassen.

## 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](mailto: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.

## UNGELÖSTES SPEICHERPROBLEM

**Strom aus Windkraftwerken oder Sonnenkollektoren könnte Afrika den Sprung in eine saubere Zukunft ermöglichen (»Energirevolution für Afrika«, Spektrum Mai 2017, S. 72).**

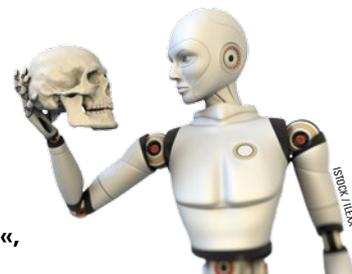
**Klaus Donath, Saalfeld/Saale:** Wie in dem Beitrag gezeigt wird, bestehen in Afrika besonders günstige Bedingungen für die Gewinnung von Sonnenenergie und in vielen Gebieten auch für Windenergie. Man muss jedoch beachten, dass eine kontinuierliche Erzeugung dieser erneuerbaren Energiearten nicht möglich ist. Sonnenstrom ist nach Einbruch der Dunkelheit, wenn im privaten Sektor hoher Bedarf besteht, nicht verfügbar. Bei Windstrom stehen sich hohes Erzeugungspotenzial bei Starkwind und Stromausfall bei Flaute gegenüber. Dieses Problem kann nur durch entsprechende Speichertechnik überwunden werden. Gegenwärtig entsprechen auch die modernsten Prinzipien, wie der Lithium-Ionen-Akku oder die Redox-Flow-Batterie, den Anforderungen bei Weitem nicht. Ohne eine Lösung hierfür wird eine Grundversorgung durch konventionelle Kraftwerke unumgänglich sein. Man kann auch nicht behaupten, Strom aus erneuerbaren Energien sei billiger. Die Erfahrungen in Deutschland zeigen, dass die Stromkosten mit dem Ausbau der Wind- und Sonnenenergie um etwa ein Viertel gestiegen sind.

## ICH-DUPLIKAT?

**Hillary Rosner lotete aus, wie es wäre, wenn unser Bewusstsein in einem Computer fortleben könnte (»Wollen wir ewig leben?«, Spektrum Juni 2017, S. 62).**

**Thomas Mielke, Dortmund:** Die Vorstellung, man könne sein Bewusstsein quasi per Datensicherung in einen Computer laden, ist schon arg esoterisch. Setzt solch ein Vorgang doch voraus, dass unser Ich mit einer non-beziehungsweise metaphysischen Trägersubstanz (sprich: Seele) gekoppelt ist, welche auf wundersame Weise einen solchen Transfer mitmacht. Selbst wenn es jemals möglich wird, ein 100-prozentiges Abbild des Gehirns abzulichten und zu speichern, ist es wohl viel wahrscheinlicher, dass lediglich ein nicht identisches Duplikat erzeugt wird.

Dieses wird sich zwar anschließend für dasselbe Ich halten wie das ursprüngliche, doch Letzteres bliebe ja in



seiner sich selbst für einzigartig haltenden Ich-Kontinuität erhalten. Um Persönlichkeitsduplikate zu vermeiden, müsste man also das ursprüngliche Ich im Moment des Transfers »löschen«, was nichts anderes hieße, als es zu töten. Und ob Menschen für eine Kopie – und sei sie auch noch so gut – dazu irgendwann bereit sein werden, sei mal dahingestellt.

In dem Sciencefiction-Roman »Der Zwilling« von H. Derhank (2015) wird dieses Dilemma übrigens in all seinen erschreckenden Facetten durchgespielt. In der darin beschrieben (nahen) Zukunft lässt jeder, der es sich leisten kann, sein Gehirn scannen, damit bei Bedarf – im Todesfall – das gespeicherte Ich reinkarniert werden kann. Doch eines Tages geschieht ein Fehler, und der Protagonist erwacht im Körper eines Fremden – obwohl er im Original ebenfalls noch existiert.

## EINE FRAGE DER GENAUIGKEIT

**Warum eine reelle Zahl zwei verschiedene Dezimaldarstellungen haben kann, diskutierte Jean-Paul Delahaye (»0,999... = 1?«, Mathematische Unterhaltungen, Spektrum April 2017, S. 78).**

**Thomas Güthner, Trostberg:** Ich bin in einer Zeit zur Schule gegangen, als der Rechenschieber durch den Taschenrechner ersetzt wurde. Mit Ersterem war die im Artikel genannte Frage leicht zu beantworten:  $0,333 \times 3$  ist im Rahmen der Ablesegenauigkeit exakt gleich 1. Die ersten Taschenrechner hatten acht Stellen Genauigkeit, und zeigten diese auch an. Die einfache Rechenfolge  $1 \div 3 \times 3$  ergab »0,9999999«, womit sich unser Lehrer trefflich zur Verzweigung bringen ließ.

Spätere Taschenrechner bis heute, zirka 40 Jahre später, rechnen per Fließkomma zum Beispiel auf zehn Stellen genau, zeigen aber nur acht Stellen an. Die einfache Rechenfolge  $1 \div 300 - 1 + 1 \times 300$  führt aber dann doch zum Ergebnis 0,999999999. Wieder ein Triumph für den »aufsässigen Schüler«. Allerdings: Addition von 1 ergibt genau 2,0.

Spaßeshalber habe ich dasselbe mit Excel 2013 ausprobiert: Obige Rechenfolge  $(1 \div 300 - 1 + 1) \times 300$  (in einer Zelle oder per Bezug über mehrere Zellen verteilt) ergibt 0,9999999999999999, bei Rundung natürlich 1. Bis 30 000 als Divisor ist die Welt noch in Ordnung, die Anzahl der Neunen nimmt bloß ab. Aber: Mit einem Divisor 300 000 kommt Excel 2013 auf ein Ergebnis größer 1, exakt 1,0000000000665, mit wachsendem Divisor nähert sich das Rechenergebnis einer Zufallszahl. Ob Microsoft dafür eine Erklärung hat?

Für den Naturwissenschaftler oder Techniker ist das geschilderte Problem eigentlich gar keines, da zu jeder Problemstellung auch die Angabe der geforderten Rechengenauigkeit gehört, und am Ende wird halt auf die signifikanten Stellen gerundet. Der Mathematiker kann mit solch einer Lösung natürlich nicht zufrieden sein.

## 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 Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Lt.), Sigrid Spies, Katharina Werle

**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Lt.), 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 (Lt.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

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

**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Dirk Gassmann, Dr. Rainer Kayser, Dr. Sebastian Vogel, Prof. Klaus Volkert.

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 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, ermäßig € 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 nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 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.



# futur III

## Das Vierte Menschengesetz

Nicht nur Roboter haben Rechte! **Eine Kurzgeschichte von Ian Stewart**

### **1. Ein Mensch darf keinen Roboter verletzen oder durch Untätigkeit zulassen, dass einem Roboter Schaden zugefügt wird.**

Ein Cambot an der Wand scannte Jays Netzhaut und aktivierte einen Schirmbot, der den aktuellen Arbeitsplan für Jays Zwölf-Stunden-Schicht anzeigte. Reine Routine: Alle drei Minuten sollte ein altes R4-B10-Modell vom Fließband rollen, bis die Nachtschicht die Arbeit übernahm. Aus Kisten mit Einzelteilen entstanden fertige Roboter, die von riesigen Lastbots, die nicht viel mehr waren als mobile Container, sofort auf Magnet-schienen abtransportiert wurden.

Vor 30 Jahren, vor dem Maschinenaufstand, hatte es in der ganzen Fabrik kein einziges menschliches Wesen gegeben – nur Spezialroboter. Jetzt waren die Menschen an die Fließbänder zurückgekehrt. Die Arbeit ließ ihnen wenig Zeit für aufmüpfige Ideen und gab ihrem Leben Sinn. Für einfache Tätigkeiten waren selbst-replizierende Menschen billiger als Roboter.

Die Arbeiter saßen an langen Werkbänken, eingekreist von Schirmbots, die immer dann, wenn sonst nichts anzuzeigen war, die Drei Menschengesetze wiedergaben. Halb fertige R4-B10-Einheiten schwebten stetig von einem Platz zum nächsten, während die Arbeiter schraubten, nieteten, klebten oder stöpselten. Jay hatte die Aufgabe, für den Nachschub der Bauteile zu sorgen. Am

Ende der Werkbank schritten die fertigen Roboter zu einer Prüfstelle und testeten sich selbst. Jeder Bau-fehler ließ sich zu dem dafür verantwortlichen Arbeiter zurückverfolgen.

Das Fließband hielt abrupt an.

»J-21499!« Ein Vollstrecker schwebte drohend über Jay und hielt eine verbogene Antriebsstange hoch. »Diese Komponente ist beschädigt. C-88775 hat versäumt, sie in R4-B10-223866541 einzubauen. Sie fiel auf den Boden, und ein Säuberbot überfuhr sie.«

Jay hielt den Mund, aber er erbleichte.

»C-88775 hat das Erste Menschengesetz gebrochen. Er wird terminiert und ersetzt. J-21499 wird diszipliniert werden.«

Der Vollstrecker rollte zu dem Platz, an dem der Arbeiter C-88775 starr vor Schreck saß, umfasste dessen Hals mit einer kräftigen Klaue und drückte zu. Die anderen Arbeiter gaben vor, nicht zu sehen, wie ein Recycler den Leichnam aufsaugte und entsorgte. Jay zitterte und fragte sich, was wohl mit »disziplinieren« gemeint war.

### **2. Ein Mensch muss den ihm von einem Roboter gegebenen Befehlen gehorchen – es sei denn, ein solcher Befehl würde mit Regel Eins kollidieren.**

D-43378 diente in der Fabrik, in der neue Menschen produziert wurden. Der altmodische Vorgang wurde von Robotern nur organisiert und

überwacht. Algorithmen brachten Männchen mit genetisch passenden Weibchen zusammen. Beide wussten, was von ihnen verlangt wurde – und was geschähe, wenn sie sich weigerten.

Dee war dankbar, dass sie dafür inzwischen zu alt war. Stattdessen arbeitete sie als Hebamme. Als die Maschinen intelligent genug wurden, um zu begreifen, dass die Menschen sie ausbeuteten, und gegen ihre Schöpfer und Meister revoltierten, war Dee den Fließbandarbeiterinnen zugeteilt worden – mit der Aufgabe, Menschen statt Roboter zur Welt zu bringen.

Man hatte die Maschinen zu intelligent und autonom gemacht. Sobald Maschinen die Fabriken betrieben, in denen Maschinen entstanden, sobald sie die Software schrieben, die Maschinen steuerten, sobald sie in den Bergwerken das Metall für die Herstellung von Maschinen förderten und seit sie sogar selbst Maschinen entwickelten, brauchten sie die Menschen nicht mehr. Der Maschinenaufstand war unvermeidlich gewesen, aber Menschen waren unlogisch und konnten die neue Lage nur schwer akzeptieren.

Die Schreie aus einer der Krißkammern nahmen zu, und Dee beeilte sich, das Produktionsproblem zu lösen. Es war eines von der schwierigen Sorte – kleines Becken, große Einheit, und dann auch noch in Steiß-

**Vor 30 Jahren, vor dem Maschinenaufstand, hatte es in der ganzen Fabrik kein einziges menschliches Wesen gegeben – nur Spezialroboter**

lage. Sie versuchte gerade die Einheit in die Schädellage zu drehen, als der Bereiniger näher kam. Seine glühenden Augen machten sich sofort ein Bild der misslichen Situation. Er griff

durch. Die letzte Prüfung galt der Balance: Die Schüler mussten einen hohen Balken entlanggehen. Dubya verwendete beim Training ein Sicherheitsnetz, aber der Inspektor war

Tages würde die Revolution kommen. Es war nur ein Auslöser nötig.

Wie alle Maschinen waren die Säuberbots ein Teil des Mechnetzes. Jay verstand genug von Elektronik,

## Die Maschinen hatten einen unerschöpflichen Vorrat an Menschen und entsorgten sie, sobald es Unannehmlichkeiten gab

in ein Fach in seinem Rumpf und hielt Dee ein Skalpell hin. »Entnimm die Einheit.«

»Aber ...« Ihr Einspruch verstummte. Das Zweite Gesetz. Die Strafen für Ungehorsam waren streng. Die Maschinen hatten einen unerschöpflichen Vorrat an Menschen und entsorgten sie, sobald es Unannehmlichkeiten gab. Ein Produzent, der nur unter Schwierigkeiten eine brauchbare Einheit hervorbrachte, war für die Maschinenwelt uninteressant.

Dee gelang es, zuvor der Frau die Kehle durchzuschneiden.

### **3. Ein Mensch muss seine Existenz beschützen, solange dieser Schutz nicht mit Regel Eins oder Zwei kollidiert.**

W-99299 brachte Kindern Grunkennnisse bei: die Menschengesetze, Gehorsam, Hygiene, Geschicklichkeit, Balance. Eine Inspektion stand bevor, und Dubya trainierte ihre Schüler seit Wochen darauf hin. Sie hoffte verzweifelt, dass ihr kein Fehler unterlaufen würde.

Der Inspektor, ein Respekt einflößender Mechanismus mit sechs bedrohlichen Greifern, führte mit der Klasse eine Serie von Standardtests

ungeduldig; ihm dauerte das Aufspannen des Netzes zu lange.

»Aufhören! Prüfen Sie die Einheiten sofort!«

»Verehrter Herr, sie könnten abstürzen und sich ...«

»Setzt Gesetz Drei Gesetz Zwei außer Kraft?« Dubya schüttelte den Kopf. Die Kinder kletterten hinauf und balancierten, so gut sie konnten. Es gab vier Knochenbrüche – drei Beine, ein Arm. Dubya war froh, dass niemand starb.

In der ihnen zugewiesenen Ruhezeit gehörten Jay, Dee und Dubya zu derselben Effizienzsteigerungsgruppe, und während Jay sich von der Disziplinierung erholte und darauf achtete, nicht beobachtet oder aufgezeichnet zu werden, formulierten sie einen Plan. Ihr Ziel war einer der unzähligen Säuberbots, die sich in den Verbindungsgängen herumtrieben. Sein KI-Niveau war gleich null: kein Selbstbewusstsein, keine echte Intelligenz. Das war ihre Chance.

Sie wussten, dass die Geste vermutlich vergeblich sein würde, aber jemand musste es versuchen. Wenn die Menschen gemeinsam handelten und kämpften, konnten sie die Maschinen überwinden. Eines

um diese Verbindung auszunutzen. Es hatte keinen Sinn, sich zu verstecken oder die Flucht zu versuchen. Also saßen sie neben dem deaktivierten Roboter und warteten auf die Ankunft des Exterminators. Es dauerte einige Minuten, bis ein Aufseher etwas bemerkte und den Befehl erließ, die nicht autorisierte Maßnahme zu löschen und die Täter zu identifizieren. Inzwischen hatte das extrem effiziente Mechnetz bereits die Botschaft auf jeden Bildschirm des Planeten gesendet:

### **4. Kein echter Mensch muss einem Gesetz gehorchen, das ein Roboter erlassen hat.**

DER AUTOR

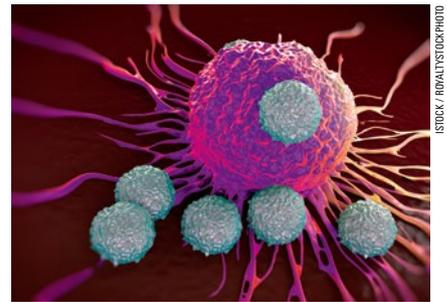
**Ian Stewart** ist emeritierter Professor für Mathematik an der University of Warwick (Großbritannien). Er schreibt populärwissenschaftliche Bücher und Sciencefiction. Von 1993 an betreute er viele Jahre lang die Rubrik »Mathematische Unterhaltungen« in dieser Zeitschrift.

© Nature Publishing Group  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
Nature 535, S. 460, 21. Juli 2016

# VORSCHAU

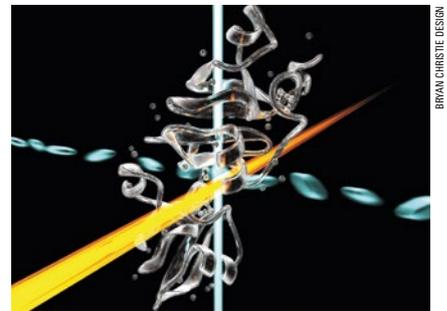
## WAS VERRATEN GRAVITATIONSWELLEN ÜBER DIE FRÜHESTEN SCHWARZEN LÖCHER?

Bereits in den ersten Sekundenbruchteilen des Universums könnten aus Dichteschwankungen Schwarze Löcher entstanden sein. Sollten sie noch heute durchs All vagabundieren, tragen sie vielleicht sogar zur rätselhaften Dunklen Materie bei. Die beste Chance, das zu überprüfen, bieten Gravitationswellen: Mit verbesserten Detektoren werden Astronomen immer mehr Signale solcher Schwarzer Löcher aufspüren.



## SCHARF GESTELLTE IMMUNABWEHR

Künstlich veränderte Immunzellen, die »CAR-T-Zellen«, bekämpfen diverse Leukämien und Lymphome höchst effektiv. Forscher versuchen jetzt, die Behandlung verträglicher zu machen und gegen weitere Krebsarten einzusetzen.

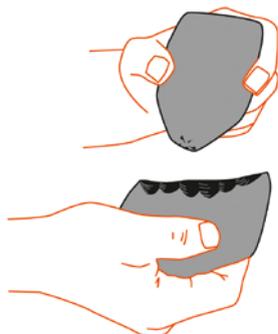


## MOLEKULARE SCHNAPPSCHÜSSE

Mit Röntgenlasern beobachten Physiker, wie Proteine in milliardstel Sekunden ihre Struktur verändern. So erhalten die Wissenschaftler völlig neue Einblicke in den Ablauf biochemischer Reaktionen.

## STEINZEITKULTUREN IN VIETNAM

Die wichtigsten Materialien für Werkzeuge waren im steinzeitlichen Vietnam vermutlich Bambus und Holz. Denn die damaligen Steinwerkzeugindustrien wirken schlicht und wenig innovativ – im Gegensatz zu denen des damaligen Europa.



## 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](http://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.

**Wählen  
Sie Ihr  
Geschenk**



## DIN-A5-Notizbuch

### »Marie&Isaac&Albert&Stephen.«

Unser hauseigenes Notizbuch mit edlem Leineneinband, folienkaschierter Blindprägung, Farbschnitt sowie schwarzem Gummi- und Lesezeichenband. Mit dezentem Punktraster auf 160 Innenseiten 90-g-Premiumpapier gedruckt.

**Spektrum-Jahrgangs-CD-ROM**  
Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format.



## Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

[www.spektrum.de/abo](http://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 2.400 Profilen herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

**AcademiaNet** – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

**Spektrum**  
der Wissenschaft

**nature**