

# Spektrum

der Wissenschaft

## Teilchenwelt vor dem Umbruch

Am weltgrößten Beschleuniger häufen sich Hinweise auf eine neue Physik



**EVOLUTION** Erst der Verlust von Gen-Schaltern machte uns zu Menschen  
**MOND** Vermutlich entstand der Erdtrabant ganz anders als gedacht  
**QUANTENCOMPUTER** Ein neues Konzept könnte den Durchbruch bringen

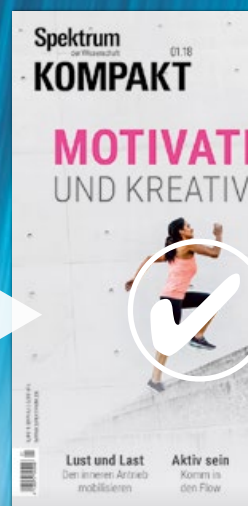
Jetzt  
neu!

# Das Spektrum KOMPAKT WAHLABO

Die **Spektrum KOMPAKT**-Printausgaben bündeln Artikel zu aktuellen Themengebieten und erscheinen 6 x pro Jahr. Die Vorteile des Wahlabonnements:

- **Sie zahlen je Heft nur € 5,40** und haben damit einen Preisvorteil von € 0,50 gegenüber dem Einzelkauf
- **Lieferung** bequem nach Hause
- **Kein Risiko:** Sie zahlen nur von Ausgabe zu Ausgabe. Jedes Kompakt wird Ihnen rechtzeitig mit Thema und Erscheinungstermin vorab per E-Mail angekündigt. Wenn Sie die Ausgabe nicht lesen möchten, brauchen Sie uns dies nur mitzuteilen, und es fallen keine Kosten für Sie an\*.

Sie  
entscheiden  
von Ausgabe  
zu Ausgabe



\* Der Preis beinhaltet die Versandkosten Inland. Bei Lieferung in Länder der EU und in die Schweiz werden die Mehrkosten von € 1,50 pro Ausgabe berechnet.

[www.spektrum.de/aktion/wahlabo](http://www.spektrum.de/aktion/wahlabo)





# EDITORIAL WES BROT ICH ESS ...?

Carsten Könneker, Chefredakteur  
koenneker@spektrum.de

Einem Modell des Münsteraner Psychologen Rainer Bromme zufolge vertrauen Menschen der Wissenschaft, wenn sie Wissenschaftler gleichzeitig in drei verschiedenen Hinsichten als glaubwürdig erleben. Da ist zunächst einmal die Expertise: Ich muss – sagen wir konkret als Leser eines **Spektrum**-Artikels – sicher sein, dass die Forscherinnen und Forscher, die hier schreiben, das jeweilige Feld beherrschen, über das sie berichten. Hinzu kommt die Integrität: Ich muss davon ausgehen können, dass niemand seine Quellen erfand oder Daten frisierte, kurz, dass sich jeder bei der wissenschaftlichen Arbeit an die Regeln seines Fachs hielt. Und zuletzt sind da noch die guten Absichten: Ich darf keine Zweifel daran haben, dass es lautere Motive sind, welche die Forscher antreiben. Das kann der Versuch sein, ein technisches oder medizinisches Problem zu lösen – aber auch pure Neugierde in der Grundlagenforschung.

Das jährlich durchgeführte »Wissenschaftsbarometer« gibt klare Hinweise darauf, dass das Vertrauen in die Wissenschaft hier zu Lande kaum an mangelnder Expertise zerbricht. Die meisten Deutschen gestehen zu, dass Forscher das, was sie tun, gelernt haben und beherrschen. Bei der Integrität wackelt es schon gehörig. So stimmten bei der letzten Erhebung im Sommer 2017 nur knapp mehr als die Hälfte der Aussage zu, Wissenschaftlern könne man vertrauen, weil sie nach Regeln und Standards arbeiten. Richtig heikel wird es bei den guten Absichten. Nur vier von zehn Bundesbürgern meinen, man könne Wissenschaftlern vertrauen, da diese im Interesse der Öffentlichkeit forschen. Ein Knackpunkt sind die Fördermittel: Drei Viertel der Deutschen sagen, hier entstehe Misstrauen, weil Wissenschaftler stark abhängig von ihren Geldgebern seien.

Zwar ist es nicht die primäre Aufgabe eines Wissenschaftsmagazins wie **Spektrum**, das gesellschaftliche Vertrauen in die Forschung zu mehren. Darum müssen sich die Wissenschaftler und ihre Institutionen schon selbst bemühen! Aber da auch viele Forscherinnen und Forscher für uns schreiben, frage ich mich, ob wir die Sache mit dem Geld nicht offensiver angehen sollten. Denkbar wäre zum Beispiel, unsere Autoren zu bitten, sämtliche Fördertöpfe zu benennen, die jene Arbeit finanzieren, über die sie in **Spektrum** berichten. Was denken Sie: gute Idee oder unnötig?

Herzliche Grüße, Ihr



## NEU AM KIOSK!

Unser Spektrum Spezial Archäologie – Geschichte – Kultur 4.17 beschreibt, über welches Wissen schon alte Kulturen verfügten.

## AUTOREN DIESER AUSGABE



MAXIMILIAN BRINCE-CEHN

### GUY WILKINSON

Dank trickreicher Präzisionsmessungen könnte ein weniger bekanntes Experiment am weltgrößten Beschleuniger die ersten Hinweise auf neue Teilchen liefern. Das Prinzip erklärt der Physiker ab S. 12.



### LEONARD PETRUCELLI AARON GITLER

Amyotrophe Lateralsklerose ist eine heimtückische Krankheit, die gravierenden körperlichen Verfall bei vollem Bewusstsein bedingt. Die Forscher stellen ab S. 36 neue Therapieansätze vor.



### SARAH-JANE LESLIE ANDREI CIMPIAN

In manchen Disziplinen gilt: kein Erfolg ohne geistige Brillanz. Eine Philosophin und ein Psychologe berichten ab S. 80, wie Vorurteile Frauen entlang dieser Maxime bei der Fächerwahl benachteiligen.

## 3 EDITORIAL

## 6 SPEKTROGRAMM

Blick in den Kristallofen

Uralte Bewässerungsanlage

Resistenz gegen Nanosilber

Die Heizung des Enceladus

Vom Reißbrett-Gen zum Design-Protein

Katalysator zur Methanveredelung

Erdkugel verschluckt Neutrinos

## 20 FORSCHUNG AKTUELL

### Gefiederfärbung

Forscher entschlüsseln die Farbe von Wellensittichen.

### Salmonellen gegen Krebs

Hochgerüstete Darmbakterien stacheln Immunzellen an.

### Heavy-Metal-Hypernova

Astronomen verfolgen ein ungewöhnliches Spektakel.

### Korallenbleiche

Riffe im Roten Meer trotzen der Ozeanerwärmung.

## 29 SPRINGERS EINWÜRFE

### Künstliche Gehirne

Könnten sie Bewusstsein besitzen?

## 49 IMPRESSUM

## 51 FREISTETTERS FORMELWELT

### Spielerische Mathematik

Ein praxisfernes Problem macht sich nützlich – abstrahiert und an unerwarteter Stelle.

## 60 SCHLICHTING!

### Surfende Wassertropfen

Herabgefallene Tropfen gehen oft erst spät unter.

## 12 STANDARDMODELL SCHÖNE NEUE TEILCHENWELT

**Serie: Grenzfragen der Teilchenphysik (Teil 1)** Bei einem Experiment am Large Hadron Collider gibt es erste Hinweise auf Wechselwirkungen, die nicht zum Standardmodell passen.

Von Guy Wilkinson

## 30 PALÄOANTHROPOLOGIE PER DNA-VERLUST ZUM MENSCHEN

Das große Gehirn, der aufrechte Gang und unser Paarungsverhalten: Dies alles hätten wir vermutlich nicht ohne die Einbuße einiger DNA-Abschnitte, die noch für unsere Menschenaffenvorfahren wichtig waren.

Von Philip L. Reno

## 36 GENETIK GEFÜRCHTETE NERVENKRANKHEIT

ALS ist ein degeneratives, bislang unheilbares Nervenleiden. Neue Techniken enthüllen nun die genetischen Ursachen und liefern Therapieansätze.

Von Leonard Petrucelli und Aaron G. Gitler

## 42 LANDWIRTSCHAFT WETTRÜSTEN MIT EINEM KÄFER

Ein gefräßiges Insekt bedroht die Maisernten der USA. Die Agrarindustrie hält mit Gentechnik und weiteren aufwändigen Mitteln dagegen – doch die Schädlinge passen sich an jede neue Strategie an.

Von Hannah Nordhaus

## 52 PLANETOLOGIE WIE ENTSTAND DER MOND?

Einige Forscher bezweifeln das LehrbuchszENARIO, ein gewaltiger Einschlag auf der jungen Erde hätte das Baumaterial für unseren Trabanten geliefert.

Von Rebecca Boyle

## 62 INTERVIEW SIEGESZUG DER QUANTEN

Der Physiker John Martinis baut für Google einen Quantencomputer, der schon bald klassische Rechner in den Schatten stellen könnte.

Von Christoph Schrader

## 68 ASTRONOMIE EIN ANTIKES GROSSFORSCHUNGSPROJEKT

**Serie: Babylonische Wissenschaft (Teil 2)** Generationen babylonischer Gelehrter erkundeten systematisch den Nachthimmel, archivierten ihre Beobachtungen und berechneten künftige Himmelsereignisse.

Von Gerd Grasshoff und Mathieu Ossendrijver

## 76 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN HAPPY END FÜR EIN GROSSES MATHERÄTSEL

Eszter und György verliebten sich bei der Arbeit an einem Problem und blieben ihr ganzes Leben zusammen. Nun ist auch das Problem gelöst.

Von Kevin Hartnett

## 80 GLEICHBERECHTIGUNG DIE AKADEMISCHE GENIEFALLE

**Serie: Frauen weltweit (Teil 3)** In manchen Disziplinen gilt intellektuelle Brillanz als Erfolgskriterium. Gerade in diesen reichen hartnäckige Vorurteile Frauen und Afroamerikanern oft zum Nachteil.

Von Andrei Cimpian und Sarah-Jane Leslie



ANASTAS PHILIP WIPER



12

TITELTHEMA  
SCHÖNE NEUE TEILCHENWELT

86 ZEITREISE

Von der Universalpflanze  
Lupine zum Rohrposttaxi

87 REZENSIONEN

**Charles Darwin:** Die Entstehung der Arten

**Alastair Bonnett:** Atlas unserer Zeit

**Andreas Müller:** 10 Dinge, die Sie über Gravitationswellen wissen wollen

**Rudolf Taschner:** Vom 1x1 zum Glück

**Andreas Brandhorst:** Das Erwachen

**Thorsten Dambeck:** Planetenwelten

**Ranga Yogeshwar:** Nächste Ausfahrt Zukunft

**Thomas Zoglauer:** Ethische Konflikte zwischen Leben und Tod

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

**Der Eindringling**

Begegnung mit einem heimtückischen Virus

98 VORSCHAU

Titelbild: generalfmv / Getty Images / iStock

AFÉ AMANKIM / GETTY IMAGES / ISTOCK; MENSCH: KATRYNARHASENKEZ / GETTY IMAGES / ISTOCK; DNA: LUCANDY / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SP. FOTODIEN WISSENSCHAFT



30

PALÄOANTHROPOLOGIE  
PER DNA-VERLUST  
ZUM MENSCHEN

PATRICK CAVAN BROWN



42

LANDWIRTSCHAFT  
WETTRÜSTEN  
MIT EINEM KÄFER

MIKE ZENG ZAPERO.COM FOR QUANTA MAGAZINE



52

PLANETOLOGIE  
WIE ENTSTAND DER MOND?

RYANKINGBB / GETTY IMAGES / ISTOCK



80

GLEICHBERECHTIGUNG  
DIE AKADEMISCHE  
GENIEFALLE

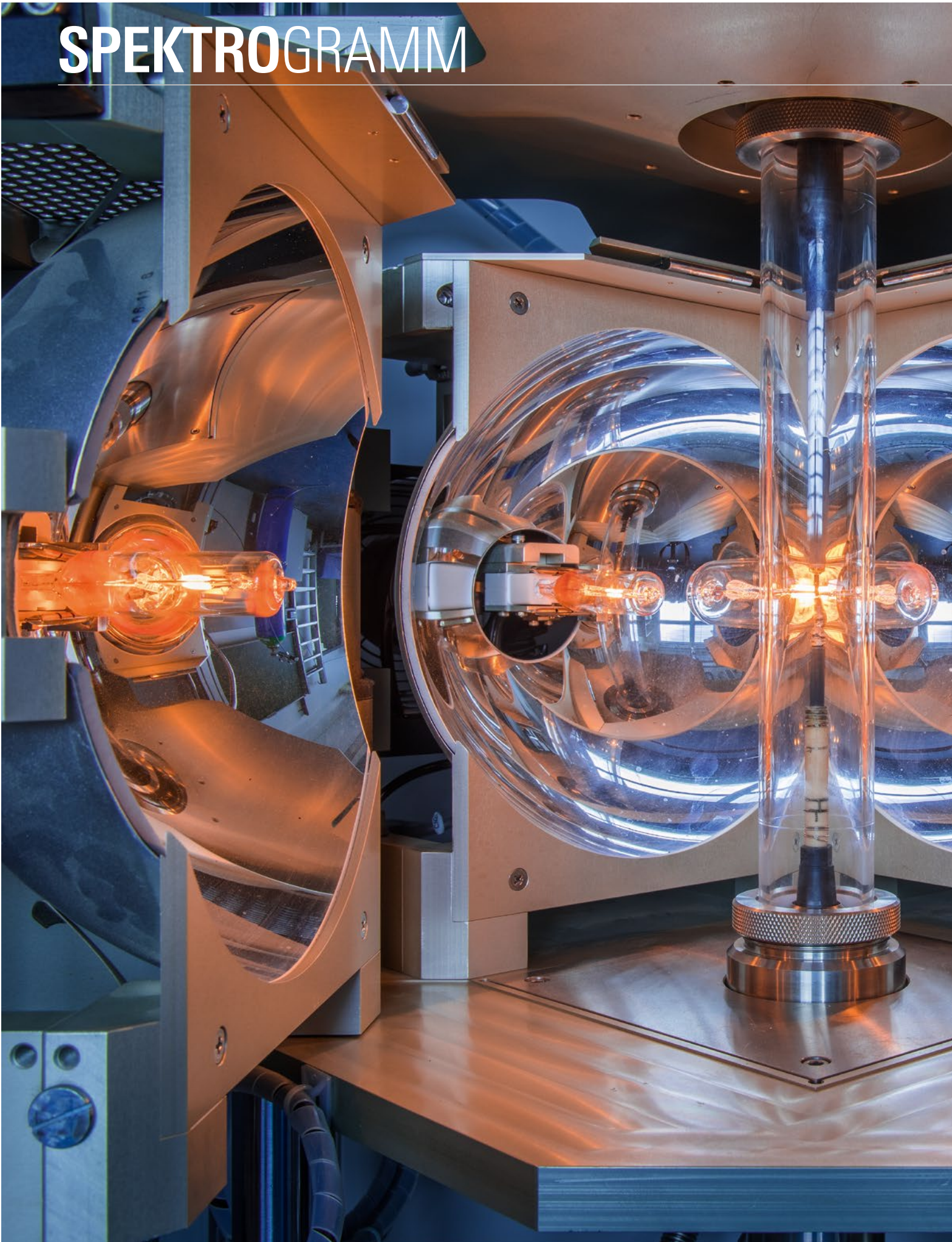


Alle Artikel auch digital  
auf **Spektrum.de**

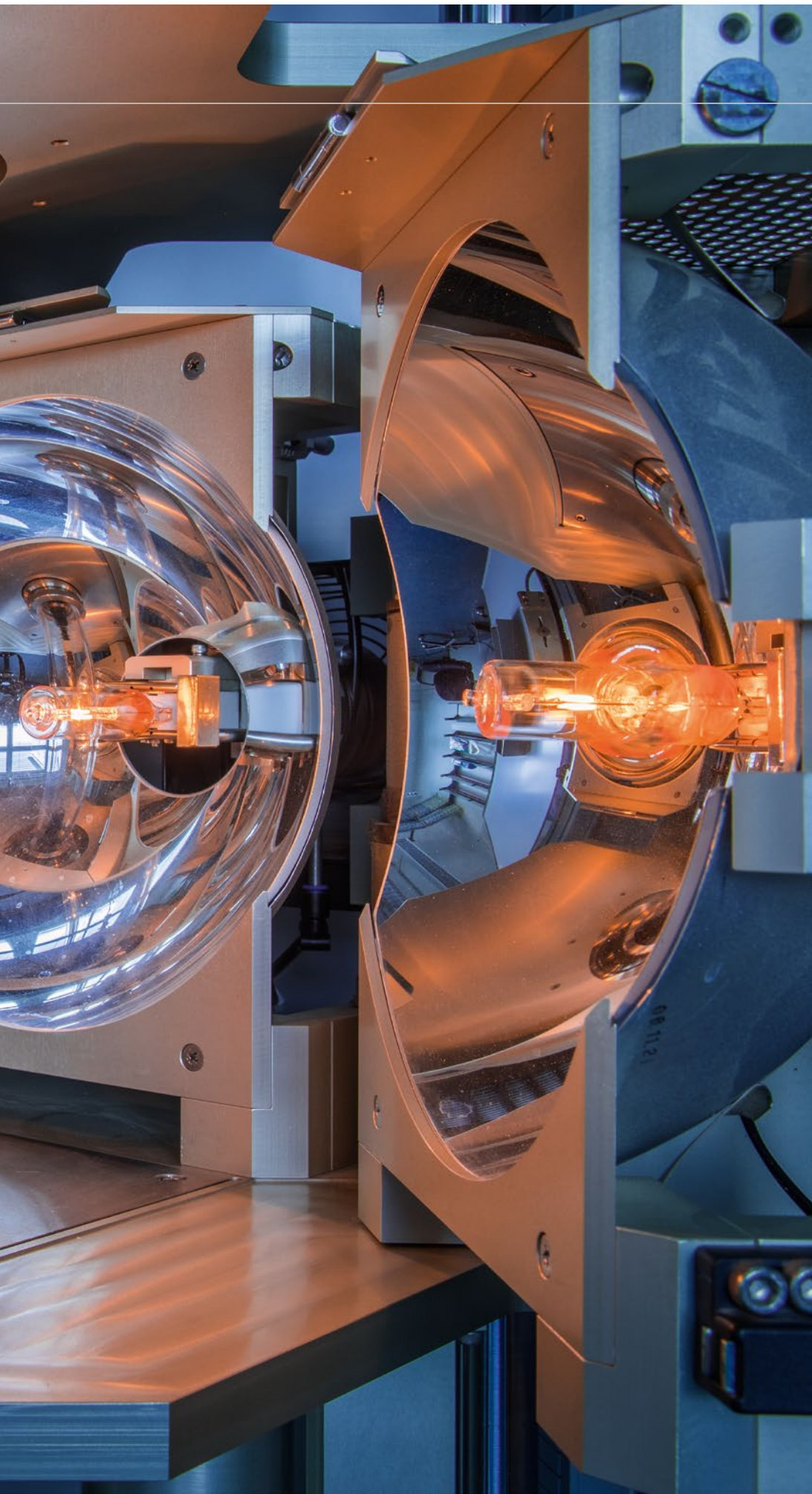
Auf **Spektrum.de** berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.



# SPEKTROGRAMM







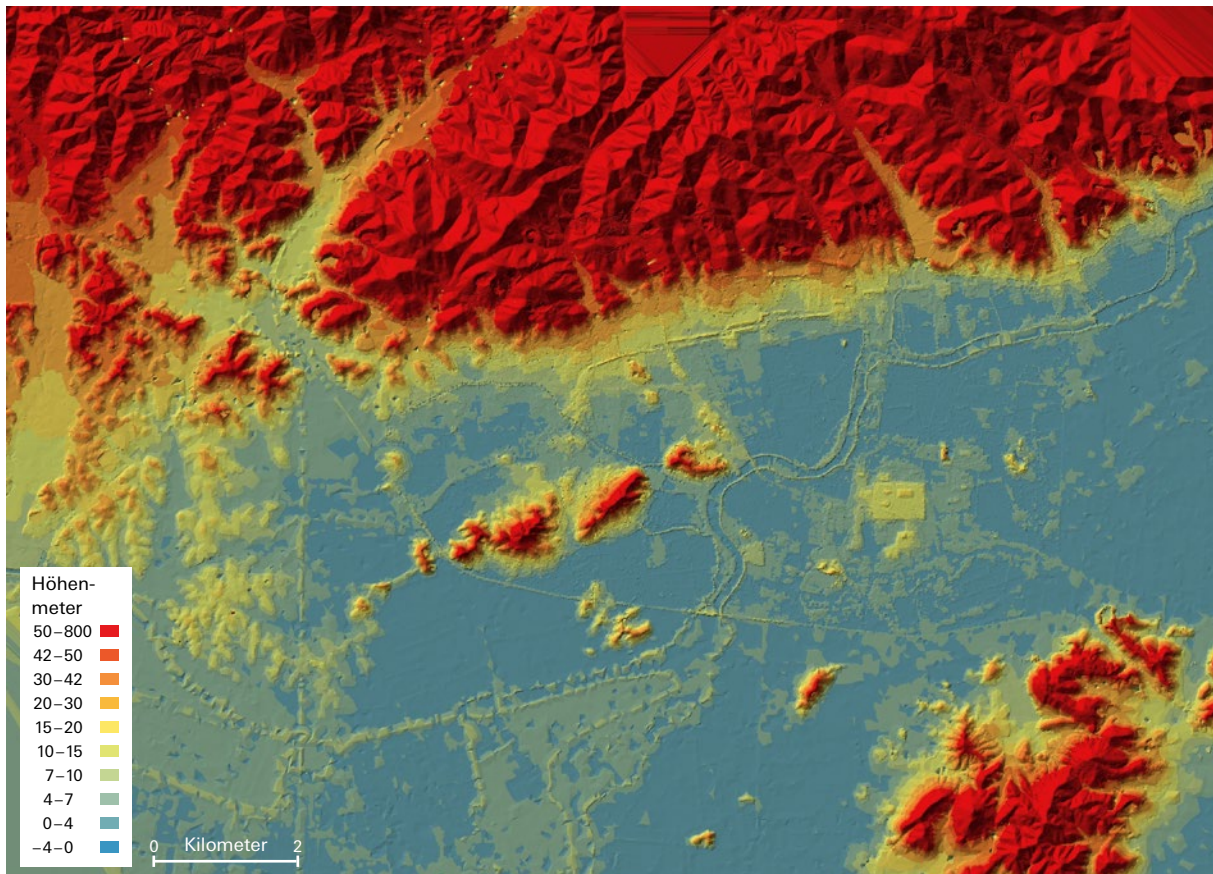
## BLICK IN DEN KRISTALLOFEN

▶ Mit einem aufklappbaren Zonenschmelzofen züchten Wissenschaftler im CoreLab für Quantenmaterialien des Helmholtz-Zentrums Berlin perfekte Kristalle. Das Gerät besteht aus vier Halogenlampen, die jeweils von einem beweglichen Hohlspiegel umgeben sind. Gemeinsam erhitzen sie eine in Zigarettenform gepresste Pulverprobe im Zentrum des Apparats auf bis zu 2000 Grad – etwa die doppelte Temperatur von flüssiger Lava. Dank der beweglichen Spiegel können die Forscher den Brennpunkt der Lampen wandern lassen und so die Probe Zone für Zone schmelzen.

Beim Abkühlen der Masse entsteht aus einem Kristallkeim ein annähernd perfekter Einkristall, der für Materialwissenschaftler enorm interessant ist. Denn die Atome darin bilden ein homogenes Kristallgitter mit sehr wenigen Fehlstellen. Dadurch lassen sich Quanteneffekte wie die Supraleitung oder exotische magnetische Phasen, bei denen es auf die Anordnung einzelner Atome ankommt, im Detail erforschen. In Kristallen aus Chemielaboren ist dies nicht so gut möglich, da deren Struktur mehr Unregelmäßigkeiten aufweist.

*HZB-Pressemitteilung, Juni 2017*





LIU, B. ET AL.: EARLIEST HYDRAULIC ENTERPRISE IN CHINA, 5100 YEARS AGO. IN: PNAS, 10.1073/PNAS.1710516114, 2017, FIG. 1B

Das Landschaftsprofil einer Region im unteren Jangtsetal offenbart Kanäle und Dämme, welche die Bewohner der Stadt Liangzhu (von der rechts im Bild noch das rechteckige Palastfundament sichtbar ist) vor 5000 Jahren anlegten.

## ARCHÄOLOGIE URALTE BEWÄSSERUNGSANLAGE

Die Menschen der Liangzhu-Kultur an der Südostküste Chinas haben nahe dem Jangtse-Delta bereits vor 5000 Jahren ein eindrucksvolles Bewässerungssystem angelegt, berichten Archäologen um Yijie Zhuang vom University College in London. Die Wissenschaftler haben in jahrelanger Arbeit ein digitales Relief der Region angefertigt, unter anderem mit Hilfe von Satellitendaten, aus dem die einstigen Kanäle und Dämme eindeutig hervortreten (siehe Bild oben). Daneben datierte

das Team etwa 500 Materialproben mit der Radiokarbonmethode.

Die spätjungsteinzeitliche Kultur der Liangzhu ist schon länger für ihren Jadeschmuck bekannt, den Archäologen in der Vergangenheit immer wieder aus Gräbern in der Region geborgen haben. Forscher schätzen, dass die Gemeinschaft in ihrer Blütezeit etwa 30 000 Mitglieder hatte, die im Umfeld einer drei Quadratkilometer großen Stadt lebten.

Die Dämme dienten offenbar dazu, die umliegenden Reisfelder vor Überflutungen durch den Jangtse zu schützen. Dank Wasserspeichern waren die Bauern außerdem unabhän-

giger vom Monsunregen und den Jahreszeiten.

Insgesamt errichteten die Liangzhu vor 4800 bis 5200 Jahren auf einer Strecke von 30 Kilometern Wasserstraßen. Das Team um Yijie Zhuang vermutet, dass die Herrscherelite der Kultur tausende Bauern zum Bau des Systems verdonnerte und das dafür binnen eines knappen Jahrzehnts drei Millionen Kubikmeter Erde bewegt wurden.

Nach einigen Jahrhunderten verließen viele Bewohner die Siedlung jedoch, möglicherweise wegen andauernder Trockenperioden. Vor etwa 4200 Jahren wurde das Gebiet dann massiv überschwemmt,

weshalb viele der Anlagen heute von einer ein Meter dicken Lehmschicht bedeckt sind.

Die Funde sprechen dafür, dass es sich bei den Liangzhu um eine frühe Form der hydraulischen Gesellschaft handelte. Dieser Gemeinschaftstyp war bis in die frühe Neuzeit in vielen Regionen Asiens die Basis von Hochkulturen wie etwa dem Khmer-Reich. Weltweit gibt es jedenfalls nur wenige ähnlich alte Anlagen, etwa die 5600 Jahre alte Jawa-Fundstelle im Jordantal und die einige Jahrhunderte jüngeren Bewässerungsprojekte in Mesopotamien.

PNAS 10.1073/pnas.1710516114, 2017



## NANOTECHNOLOGIE RESISTENZ GEGEN SILBERTEILCHEN

► Krankheitserreger können sich vor antibakteriellen Silber-Nanopartikeln schützen, indem sie mehr des weit verbreiteten Proteins Flagellin erzeugen. Das berichtet eine Arbeitsgruppe um Radek Zbořil von der Palacký University Olomouc in der Tschechischen Republik. Aus Flagellin bestehen die fadenförmigen Gebilde, mit denen sich viele Bakterien fortbewegen, die so genannten Flagellen.

Silber-Nanoteilchen hingegen kommen als Keimbekämpfer in vielen Gebrauchsgegenständen und medizinischen Geräten zum Einsatz. Über mögliche Resistenzen diskutieren Fachleute seit Jahren.

Die Wissenschaftler um Zbořil gingen der Sache nun auf den Grund, indem sie zwei Stämme des Darmbakteriums *Escherichia coli* sowie den oft multiresistenten und in Krankenhäusern weit verbreiteten Erreger *Pseudomonas aeruginosa* geringen Konzentrationen von Nanosilber aussetzten.

Bereits nach wenigen Wachstumszyklen waren die Bakterien widerstandsfähiger gegenüber den Nanoteilchen. Im Lauf des Versuchs entwickeln die Erreger sogar eine komplette Resistenz. Hinter der Widerstandskraft steckt ein ungewöhnlicher Mechanismus, berichten die Forscher. Im Unterschied zu üblichen Antibiotikaresistenzen sind die Bakterien weiterhin empfindlich gegen Silberionen. Allerdings halten sie das Edelmetall von sich fern, indem sie Flagellin ausscheiden und damit die fein verteilten

Ionen verklumpen lassen. In den Kulturschalen der resistenten Bakterien bildete sich bei den Tests der Forscher ein grauer Bodensatz aus Silber und bakteriellem Eiweiß.

In weiteren Untersuchungen belegte die Arbeitsgruppe, dass der Effekt durch überschüssiges Flagellin in der Lösung entsteht. Das Protein spielt auch bei der Bildung von Biofilmen eine Rolle, weshalb viele Bakterien es in großen Mengen ausschütten können.

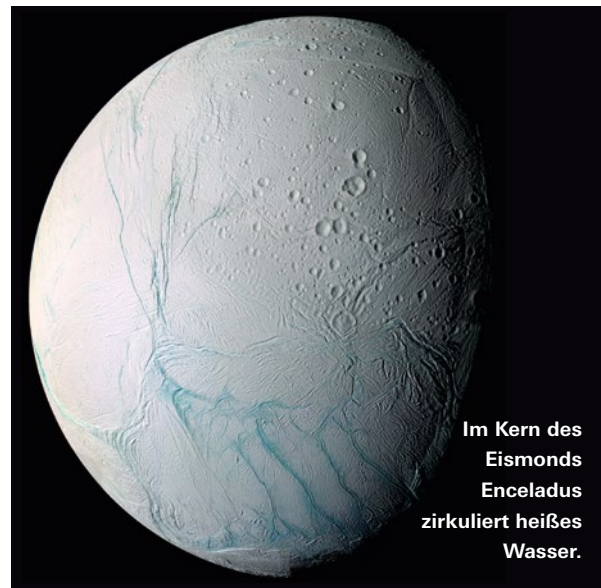
*Nat. Nanotechnol.* 10.1038/s41565-017-0013-y, 2017

## ASTRONOMIE DIE HEIZUNG DES ENCELADUS

► Forscher haben möglicherweise die Wärmequelle identifiziert, die den unterirdischen Ozean auf Enceladus flüssig hält. Die Raumsonde Cassini, deren Mission im September 2017 endete, hatte über dem Südpol des Saturnmonds wiederholt Fontänen aus Wasserdampf und Eiskristallen beobachtet. Auch Unregelmäßigkeiten im Schwerefeld des Trabanten sprechen dafür, dass sich unter seinem mehrere Kilometer dicken Eisanspanzer ein Meer verbirgt, an dessen Grund hydrothermale Quellen blubbern.

Aber woher beziehen die Unterwasserschote ihre Energie? Die Wissenschaftler um Gaël Choblet von der Université de Nantes und Frank Postberg von der Universität Heidelberg glauben diese Frage nun beantworten zu können. Sie gehen davon aus, dass der Kern des Eismonds nicht etwa eine feste Masse bildet, wie man bisher annahm. Stattdessen handele es sich eher um eine lose Ansammlung von eisenhaltigen Körnchen, die von feinen Wasseradern durchzogen ist. Diese Zusammensetzung ist denkbar, da das Innere des nur 504 Kilometer großen Mondes von der Schwerkraft vergleichsweise schwach zusammengedrückt wird.

Eine dreidimensionale Computersimulation der Forscher legt nahe, dass die lose Zusammensetzung der Schlüssel für die Energiequelle auf Enceladus ist: Da der Mond den Saturn auf einer elliptischen Bahn umrundet, wird sein Inneres laufend von Gezeitenkräf-



Im Kern des Eismonds Enceladus zirkuliert heißes Wasser.

NASA/JPL/SPACE SCIENCE INSTITUTE

ten durchmischt. Bei der Reibung zwischen den Körnchen entstehen gut 10 Gigawatt an Wärme – genug, um das Nass unter der Kruste dauerhaft flüssig zu halten. Das Wasser im Kern ist demnach mindestens 90 Grad Celsius warm und breitet sich vor allem in Richtung der Pole aus. Die Planetologen vermuten, dass im Inneren des Mondes seit Langem ein Kreislauf besteht: Sich abkühlendes Wasser sickert immer wieder in den Kern hinab, wo es erwärmt wird und dann in den Ozean unter der Eiskruste zurückkehrt.

*Nature Astronomy* 1, S. 841–847, 2017

## BIOLOGIE VOM REISSBRETT- GEN ZUM DESIGN-PROTEIN

► Ein zum Teil künstliches Bakterium erzeugt Proteine mit Hilfe eines menschengemachten neuen Basenpaars im Erbgut, berichtet eine Arbeits-

gruppe um Floyd E. Romesberg vom Scripps Research Institute in Kalifornien. Das Team hatte bereits 2014 Schlagzeilen gemacht, als es das künstliche Basenpaar dNaM-dTPT3 zusätzlich zu A-T und C-G in das Erbgut des Bakteriums *Escherichia coli* einfügte. Zu jener Zeit waren die

beiden neuen Buchstaben jedoch noch funktionslos. Mit der jetzt vorgestellten Technik ändert sich das: Nun sind die Buchstaben Teil von zwei neuen Basenkombinationen (»Codons«), welche die Aminosäuren Propargyllysin (PrK) und Azidophenylalanin (pAzF), die nicht in natürlichen Eiweißstoffen vorkommen,

in Proteine einbauen. Dabei übersetzt die veränderte Zelle die künstlichen Basen originalgetreu in entsprechende RNA und überträgt diese in Ribosomen mit Hilfe spezieller tRNA hochpräzise in ein fluoreszierendes Protein mit den künstlichen Bauteilen, berichten die Forscher.

## CHEMIE KATALYSATOR ZUR METHANVEREDELUNG

► Beim Fördern und Verarbeiten von Erdöl fällt als Nebenprodukt Methan an. Oft ist es unwirtschaftlich, das Erdgas energetisch zu nutzen oder in andere chemische Grundstoffe umzuwandeln. Große Mengen



Mit Fracking-Türmen wie hier im US-Bundesstaat Louisiana werden gewaltige Mengen Methan gewonnen. Ein neues Verfahren wandelt das Gas in Methanol und Essigsäure um.

GRANDRIVER / GETTY IMAGES / ISTOCK

davon werden daher einfach abgefackelt – allein in den USA zirka sechs Milliarden Kubikmeter jährlich. Gleichzeitig hat der Fracking-Boom jenseits des Atlantiks die Produktion von methanhaltigem Schiefergas in den vergangenen zehn Jahren stark angefacht. Entsprechend hoch ist das Interesse an einem Prozess, mit dem sich Methan kostengünstig in industriell begehrte Kohlenwasserstoffe verwandeln lässt.

Chemiker um Junjun Shan von der Tufts University in Massachusetts haben nun ein Verfahren entwickelt, das Methan, Kohlenmonoxid und Sauerstoff bei relativ geringem Druck und niedriger Temperatur in Methanol und Essigsäure überführt. Dazu leiten die Forscher die Gase in einen Druckreaktor ein und bringen sie mit verschiedenen Katalysatoren in Kontakt. Nach sechs Stunden entstehen aus dem Methan so entweder bis zu 4 Prozent Methanol oder bis zu 60 Prozent Essigsäure. Die beiden Flüssigkeiten sind wichtige Rohstoffe der Kunststoff- und Lebensmittelindustrie; Methanol dient zudem als Treibstoff.

Als Katalysator nutzten die Wissenschaftler isolierte Rhodiumionen, die in porösem Aluminiumsilikat (Zeolit) oder Titandioxid verankert sind. Während der Rhodium-Titandioxid-Katalysator ausschließlich zur Bildung von Methanol führt, entscheidet bei der Zeolit-Variante die molekulare Zusammensetzung über das Reaktionsprodukt: In Anwesenheit des unbehandelten Katalysators vereinen sich Methan und Sauerstoff – unter Einlagerung eines Moleküls Kohlenmonoxid – zu Essigsäure. Tauscht man im Trägermaterial Wasserstoffionen gegen Natriumionen, entsteht hingegen überwiegend Methanol.

Insgesamt könnte das Verfahren dazu beitragen, dass künftig weniger Erdgas abgefackelt wird, berichten die Chemiker. Allerdings müsse man die Effizienz noch steigern, um die Methode kommerziell interessant zu machen.

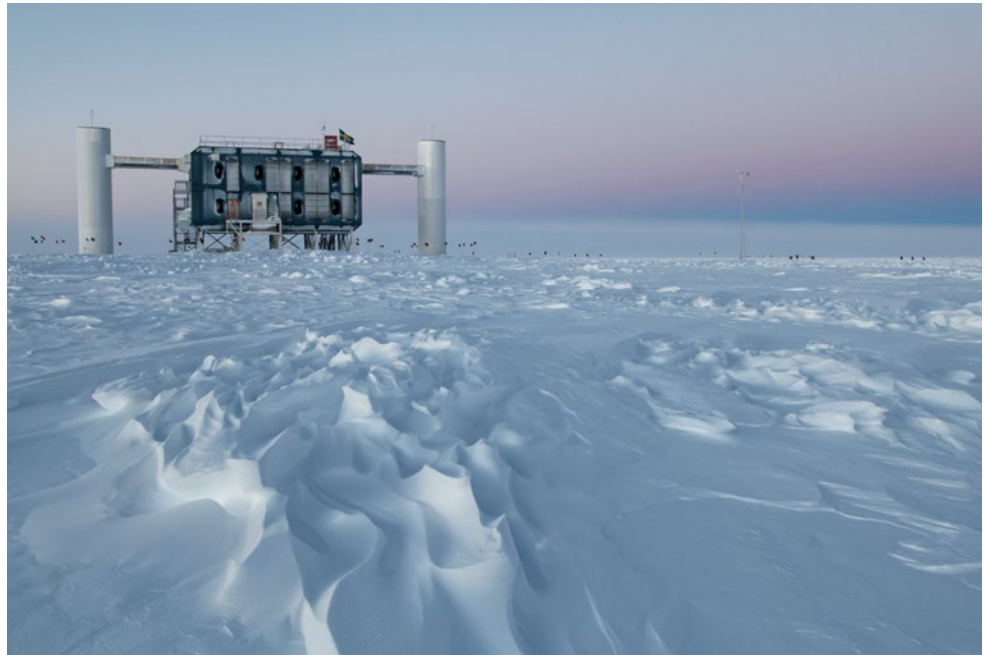
*Nature* 551, S. 605–608, 2017



Der Text des Erbguts, der in Proteine übersetzt wird, besteht eigentlich nur aus den vier Buchstaben C, T, G und A. Seit zwei Jahrzehnten forschen Wissenschaftler jedoch an Möglichkeiten, dieses Repertoire zu erweitern. Dabei reicht es nicht, nur zwei neue Moleküle ins Erbgut einzuschleusen. Das zusätzliche Basenpaar darf die Bakterien nicht an der Vermehrung hindern, und es muss Zellteilungen überstehen, ohne wieder verloren zu gehen. Erst seit Ende 2016 erfüllt Romesbergs Bakterium diese Kriterien. Daneben müssen die neuen Buchstaben aber auch noch in RNA übertragen und im Ribosom korrekt ausgelesen werden – erst dann handelt es sich um genetische Information.

Um diese Bedingung zu erfüllen, stellte das Team dem veränderten Erbgut eine ganze Palette Hilfsmoleküle zur Seite, darunter spezielle tRNA, welche die Codons mit den künstlichen Basen erkennen und daraufhin eine der neuen Aminosäuren an eine wachsende Eiweißkette hängen. Ob die Arbeit auch für praktische Anwendungen bedeutsam ist, lässt sich bisher noch nicht absehen. Einerseits bietet ein erweiterter genetischer Kode Raum für neue Aminosäuren, die in maßgeschneiderte Proteine mit bisher unerreichbaren Eigenschaften eingebaut werden könnten. Andererseits gibt es bei den meisten möglichen Anwendungen der Technik einfachere Verfahren, die dasselbe mit weniger Aufwand erreichen.

*Nature 551, S. 644–647, 2017*



SVEN LINDBLÖM, ICECUBE / NSF

**Neutrinojagd in der Antarktis: Rund um das IceCube-Labor an der Amundsen-Scott-Südpolstation reichen dutzende Bohrlöcher 2,5 Kilometer in die Tiefe. Die darin versenkten Detektoren spüren Neutrinos auf, die im Weltall entstanden sind.**

## PHYSIK ERDKUGEL VERSCHLUCKT NEUTRINOS

► Normalerweise durchdringen Neutrinos Materie fast ungehindert. Wer die geisterhaften Elementarteilchen beispielsweise mit Blei stoppen will, muss ihnen einen Klotz mit einer Kantenlänge von einem Lichtjahr in den Weg stellen. Und selbst das hält nur grob die Hälfte der Teilchen auf.

Aber schon länger vermuten Physiker, dass Neutrinos, die viel Energie huckepack tragen, weit häufiger von Atomkernen absorbiert werden. Forschern des Observatoriums IceCube am Südpol ist es nun gelungen, diese Vermutung zu bestätigen. Die Wissenschaftler haben rekonstruiert, wie viele

Neutrinos mit einer Energie zwischen 6 und 980 Teraelektronvolt (TeV) den Detektor in den Jahren 2010 und 2011 trafen, und aus welcher Richtung sie jeweils kamen. Dabei zeigte sich: Je höher die Energie eines Neutrinos war, desto eher wurde es von der Erde abgefangen.

IceCube besteht aus etwa 5000 Fotosensoren, die an langen Fäden in insgesamt 86 Bohrlöchern hängen. Damit will man in erster Linie Neutrinos aufspüren, die aus weit entfernten Regionen des Weltalls stammen. Kollidiert eines der Teilchen im antarktischen Eis mit einem Atomkern, entstehen in einer Kernreaktion geladene Partikel, so genannte Myonen. Sie senden bei ihrem Weg durch die Eismasse kurze Lichtblitze aus, worauf die Detektoren von IceCube anspringen.

Letztlich können die Forscher so die Flugrichtung und Energie des absorbierten Neutrinos rekonstruieren.

Wie die Analyse zeigte, erreichten ab einer Energie von 40 TeV fast nur solche Neutrinos den Detektor, die nicht aus Richtung der Erdkugel – sozusagen von unten – kamen. Alle anderen Partikel wurden also von Atomkernen unter unseren Füßen verschluckt. Das Ergebnis bestätigt die Gleichungen des Standardmodells der Teilchenphysik, die einen Anstieg der Absorptionsrate in diesem Maß vorhersagen. Einige Forscher dürften hingegen enttäuscht sein: So prognostizieren manche Erweiterungen des Weltmodells der Physiker, dass irdische Materie hochenergetische Neutrinos noch viel bereitwilliger abfängt.

*Nature 551, S. 596–600, 2017*



SERIE

## Grenzfragen der Teilchenphysik

Teil 1: **Februar 2018**

**Schöne neue Teilchenwelt**

Guy Wilkinson

Teil 2: **März 2018**

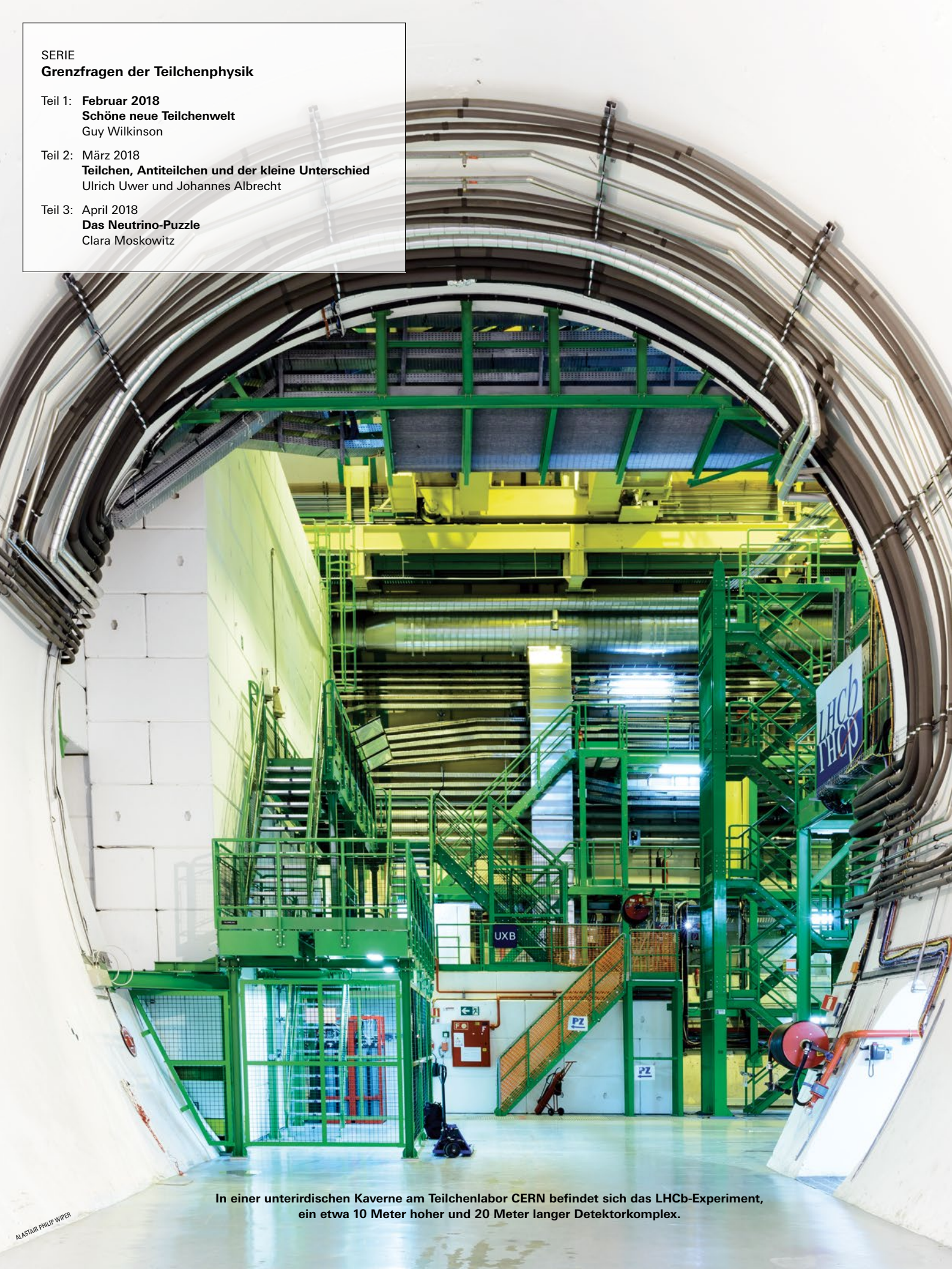
**Teilchen, Antiteilchen und der kleine Unterschied**

Ulrich Uwer und Johannes Albrecht

Teil 3: **April 2018**

**Das Neutrino-Puzzle**

Clara Moskowitz



In einer unterirdischen Kaverne am Teilchenlabor CERN befindet sich das LHCb-Experiment, ein etwa 10 Meter hoher und 20 Meter langer Detektorkomplex.



# STANDARDMODELL SCHÖNE NEUE TEILCHENWELT

**NEUE SERIE: TEILCHENPHYSIK** Bei einem Experiment am Large Hadron Collider gibt es erste Hinweise auf Wechselwirkungen, die nicht zu den bisherigen Modellen passen. Theoretiker rätseln bereits, ob daran bislang unbekannte Teilchen beteiligt sein könnten.



**Guy Wilkinson** ist Teilchenphysiker an der Universität Oxford. Er war von 2014 bis 2017 Sprecher des LHCb-Experiments am CERN.

► [spektrum.de/artikel/1527645](https://spektrum.de/artikel/1527645)

Die Fernsehnachrichten eröffnen normalerweise nicht mit einer Meldung aus der Physik. Der 4. Juli 2012 war eine Ausnahme: Da schaute die ganze Welt nach Genf, wo Physiker des Teilchenbeschleunigers Large Hadron Collider (LHC) gerade das erfolgreiche Ende einer 50 Jahre währenden Suche nach dem so genannten Higgs-Boson verkündet hatten. So lange schon war das Teilchen für Experimentalphysiker das letzte fehlende Puzzleteil im Standardmodell der Teilchenphysik gewesen – der Theorie, die alle subatomaren Bausteine des Alls mitsamt ihren Wechselwirkungen umfasst.

Die Entdeckung wurde triumphal gefeiert. Doch viele Physiker glauben inzwischen, es müsse noch mehr Elementarteilchen geben, als das Standardmodell vorsieht, und sie haben sich auf eine anspruchsvolle Suche nach diesen Sonderlingen begeben. Die großen Experimente ATLAS und CMS, die das Higgs am LHC gefunden haben, werden bei dieser Jagd weiterhin fraglos eine wichtige Rolle spielen. Doch ein kleineres und weniger bekanntes Projekt an einer anderen Stelle des Beschleunigers könnte am Ende die Nase vorn haben: das LHCb.

Dieses Experiment basiert auf einem fundamental anderen Konzept als ATLAS, CMS und viele andere Detektoren. Während letztere darauf ausgelegt sind, neuartige Teilchen direkt zu erzeugen, setzt das LHCb auf so genannte Beauty-Hadronen (das »b« steht für das Kürzel der dabei wichtigen Beauty-Quarks). Mit ihnen lassen sich die Effekte von Teilchen beobachten, die wir nicht direkt herstellen können, die sich aber hinter den Kulissen subtil auf den Ablauf der Reaktionen auswirken. Am LHCb schauen Physiker, was passiert, wenn Beauty-Hadronen

am LHC erzeugt werden und kurz darauf in andere Teilchen zerfallen. Beauty-Hadronen sind hervorragende Untersuchungsobjekte, da sie auf zahlreiche verschiedene Arten zerfallen und Theoretiker sehr genaue Vorstellungen davon haben, wie die Reaktionen ablaufen sollten. Jede Abweichung von den Vorhersagen wäre ein deutlicher Hinweis darauf, dass sich währenddessen irgendwo unbekannte Teilchen eingemischt haben.

Eine solche indirekte Suche ist allerdings komplex und erfordert extreme Präzision. Im Gegenzug lassen sich mit

## AUF EINEN BLICK DETEKTIVSUCHE NACH EXOTEN

- 1** Am Large Hadron Collider (LHC) spürt das Experiment LHCb auf trickreiche Weise neuen Teilchen nach, die sich nur indirekt im Lauf gewisser Zerfälle bemerkbar machen.
- 2** Solche »virtuellen« Teilchen können theoretisch viel höhere Energien besitzen, als die eigentliche Kollisionsenergie des LHC zulässt. Physiker am LHCb hoffen, auf diese Weise neue Teilchen zu entdecken.
- 3** Erste Daten deuten auf Effekte hin, die über das Standardmodell hinausgehen. Sollten sich die Messungen erhärten, muss das Theoriegebäude deutlich erweitert werden.



ihr prinzipiell Teilchenarten aufspüren, die an ATLAS und CMS unmöglich entstehen können. Dank des LHCb gibt es bereits erste Hinweise auf Phänomene, die sich mit den bekannten Gesetzen der Physik nicht hinreichend erklären lassen. Vielleicht werden wir gerade Zeugen des Wirkens völlig neuer Teilchen und Kräfte.

Dabei war das so genannte Standardmodell bislang äußerst erfolgreich dabei, die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen zu beschreiben. Es ordnet die Teilchen zunächst in zwei fundamentale Bausteine der Materie, die Quarks und die Leptonen (siehe »Ein unvollständiges Modell?«, unten).

Es gibt sechs Quarks, die paarweise zu drei »Generationen« gehören: Up und Down, Charm und Strange sowie Beauty (auch Bottom genannt) und Top. Quarks kommen in der Natur niemals allein vor, sondern immer zu mehreren in Form von »Hadronen«. Die bereits erwähnten und für das LHCb besonders wichtigen Beauty-Hadronen sind solche zusammengesetzten Teilchen, die ein Beauty-Quark enthalten. Analog werden auch die Leptonen in Gruppen aufgeteilt. Das Elektron und das Elektron-Neutrino gehören zusammen, dann das Myon und das Myon-Neutrino, und zuletzt das Tau und das Tau-Neutrino.

Die gewöhnliche Materie besteht aus Elementarteilchen der ersten Generation: den Up- und Down-Quarks sowie dem Elektron. Bausteine aus den beiden anderen Generati-

onen sind weniger alltäglich und tauchen nur unter extremen Bedingungen auf, etwa in Teilchenbeschleunigern. Auf all diese Teilchen wirken verschiedene Kräfte – allein die Gravitation ist auf subatomarer Ebene völlig unbedeutend und lässt sich vernachlässigen. Übrig bleiben der Elektromagnetismus sowie die schwache und die starke Wechselwirkung. Auch zu ihnen gehören jeweils Teilchen, die sie übertragen, wie etwa das Photon für den Elektromagnetismus. Eine besondere Rolle nimmt das 2012 entdeckte Higgs-Boson ein. Es gehört zu einem Mechanismus, bei dem die Teilchen überhaupt erst ihre Masse erhalten.

Dennoch wissen wir, dass etwas an dieser Ordnung nicht stimmt. Das ist eine zugegeben etwas plakative Formulierung des unter Physikern bevorzugten Sprachgebrauchs, das Standardmodell sei unvollständig. Es ist extrem erfolgreich, wenn es darum geht, gewisse Fragen zu beantworten, aber bei anderen muss es passen. So geht aus ihm beispielsweise nicht hervor, warum es im Universum mehr Materie als Antimaterie gibt oder was sich hinter der unsichtbaren Dunklen Materie verbirgt. Die auf kosmischen Skalen dominante Kraft, die Gravitation, kommt im Standardmodell überhaupt nicht vor, und bisher sind alle Versuche misslungen, sie formal einzubeziehen.

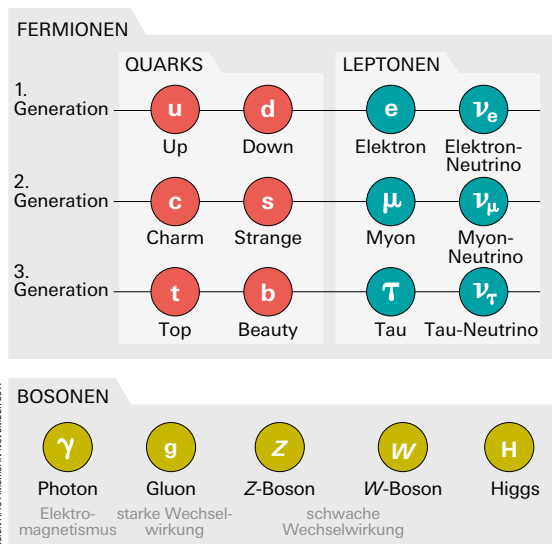
### Trotz seiner Erfolge kann das Standardmodell nur die gute Näherung einer besseren Theorie sein

Selbst im Bereich der bekannten subatomaren Teilchen bleiben Fragen offen. Die Masse des Higgs-Bosons liegt beispielsweise nur leicht oberhalb der Massen der so genannten W- und Z-Bosonen, welche die schwache Wechselwirkung übertragen. Eigentlich sollte es zehn Milliarden Mal so schwer sein. Und auch für die Gruppierung in drei Generationen gibt es keine tiefere Begründung. Die Teilchen in den einzelnen Generationen verhalten sich wie Kopien voneinander, abgesehen von ihren Massen und deren strikt hierarchischer Anordnung – von den leichtesten Up- und Down-Quarks bis hin zum Top-Quark, das fast so schwer ist wie ein Goldatom. Zu den Gründen dafür und zu vielen weiteren Problemen schweigt das Standardmodell. Darum muss es sich bei ihm, trotz seiner herausragenden vergangenen Erfolge, lediglich um eine gute Näherung handeln, um die bisher allein sichtbare Fassade einer besseren Theorie, von der sich Physiker Antworten auf die offenen Fragen erhoffen. Unser Ziel am LHCb ist es – zusammen mit ATLAS, CMS und anderen weltweiten Versuchen –, Einblicke in diese bessere Theorie zu erhalten, und zwar in Form unentdeckter Teilchen, die sich im Experiment offenbaren.

Der Large Hadron Collider, die Heimat des LHCb, ist ein 27 Kilometer langer, kreisförmiger Beschleuniger, in dem sich zwei Strahlen aus extrem energiereichen Protonen begegnen. Die beinahe lichtschnellen Teilchen treffen bis zu 40 Millionen Mal pro Sekunde aufeinander, werden dabei zerschmettert und setzen am Ort ihres Zusammenstoßes immense Energie frei. Diese kondensiert zu neuen Teilchen, die sich von den Protonen, aus denen sie hervorgegangen sind, stark unterscheiden. Einige der Kollisionsprodukte enthalten auch Beauty-Quarks, und sie haben im Allgemeinen eine sehr kurze Lebensdauer. Die speziell

## Ein unvollständiges Modell?

Das Standardmodell der Teilchenphysik enthält alle bekannten Teilchen und ihre Wechselwirkungen. Je sechs Quarks und Leptonen bilden die Bausteine der Materie; fünf Bosonen übertragen die Kräfte. Viele Theoretiker meinen, es müsse mehr Elementarteilchen geben, und zahlreiche Experimente suchen danach – bislang vergeblich.





Autor Guy Wilkinson vor dem LHCb. Hier untersuchen Physiker gezielt eine bestimmte Teilchensorte, die bei Kollisionen im Large Hadron Collider entsteht.

MAXIMILIEN BRIDGE CERN

dafür ausgelegten Detektoren des LHCb registrieren ihre Zerfallsprodukte.

Das LHCb liegt etwa vier Kilometer abseits des CERN-Hauptlabors direkt neben dem Flughafen Genf. Die meisten Gebäude stammen noch von einem früheren Experiment und sind recht funktional gehalten. Von den Start- und Landebahnen aus können Flugzeugpassagiere die Haupthalle des LHCb leicht anhand eines großen runden Fensters erkennen – das einzige architektonische Zugeständnis an ästhetische Ansprüche. Der Detektorkomplex selbst befindet sich in einer Kaverne 100 Meter unter der Erde und ist mit einer Länge von 20 Metern und einer Höhe von 10 Metern ein durchaus imposanter Anblick (siehe Foto S. 12). Das LHCb beeindruckt selbst im Vergleich zu den noch einmal deutlich größeren Detektoren an anderen Stellen des LHC-Rings durch ungewöhnliche Proportionen. Wegen seiner Länge lässt sich der Weg von Beauty-Hadronen besonders gut verfolgen. Die enthaltenen Beauty-Quarks besitzen relativ wenig Masse – etwa fünf Gigaelektronvolt (GeV), die in der Hochenergiephysik übliche Einheit; das entspricht grob der Masse eines Heliumatoms. Darum ist bei der Entstehung von Beauty-Hadronen immer sehr viel Energie übrig. Diese schleudert die Teilchen von dem Punkt, an dem die Protonenstrahlen kollidieren, stark in Vorwärtsrichtung weiter.

Trotz seiner besonderen Geometrie sind zahlreiche Komponenten des LHCb ähnlich wie bei anderen Detektoren. Es gibt einen riesigen Magneten, außerdem Spurdetektoren, um die Flugbahnen der produzierten Teilchen nachzuvollziehen. So genannte Kalorimeter messen deren Energie.

Vieles am LHCb ist hingegen einzigartig und speziell für die Physik der Beauty-Quarks konstruiert. So befindet sich

ein besonderer Halbleiterdetektor nur acht Millimeter vom zentralen Strahl des LHC entfernt (siehe Bild S. 18). Er erlaubt eine hochpräzise Rekonstruktion des genauen Punkts, von dem ein Teilchen ausgegangen ist. Das ist besonders nützlich, weil die Beauty-Hadronen trotz ihrer extrem hohen Geschwindigkeit meist nach nicht einmal einem Zentimeter Flugstrecke in leichtere Teilchen zerfallen. Deren Eigenschaften wiederum vermessen so genannte RICH-Detektoren (für »ring-imaging Cherenkov detector«) anhand der typischen Strahlung, die sie beim Durchgang durch besondere optische Medien aussenden.

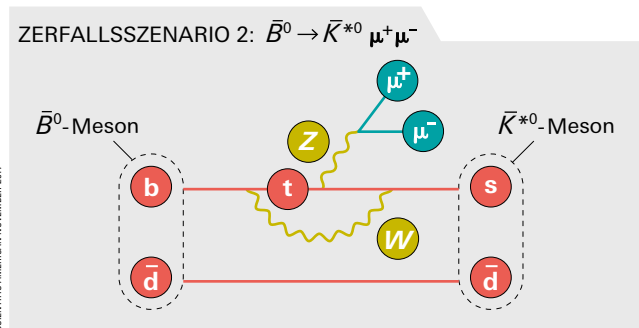
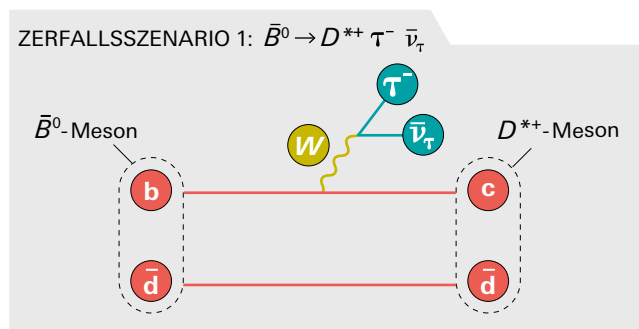
#### **Neue Bausteine des Theoriegebäudes könnten sich zunächst nur indirekt bemerkbar machen**

Während der ersten Experimentierphase am LHC von 2010 bis 2012 hat der Beschleuniger beinahe eine Billion Beauty-Hadronen im LHCb produziert. Die Hadronen können auf vielerlei Weise zerfallen, wobei einige dieser Prozesse besonders interessant sind, da sie auf »neue Physik« hindeuten könnten – Phänomene, die das Standardmodell nicht erklären kann.

Physiker haben verschiedene Ideen dazu, was wir für ein verbessertes Theoriegebäude benötigen. Die meisten Ansätze basieren auf neuen Teilchen, die massereicher sind als die bekannten. Deswegen strebt das LHC auch nach so hohen Kollisionsenergien, mit denen sich aktuell Teilchen mit bis zu einigen Tausend GeV erzeugen lassen. Zum Vergleich: Die Masse des Higgs-Bosons liegt bei 125 GeV, die des Protons bei 0,9 GeV. ATLAS und CMS sind darauf ausgelegt, direkt nach derart schweren Teilchen zu suchen und deren charakteristische Zerfallsprodukte zu identifizieren. Es gibt jedoch noch eine andere,

besonders listige Möglichkeit, neue Physik zu finden. Dabei machen sich unbekannte Teilchen »virtuell« bemerkbar, indem sie die Zerfälle bereits bekannter Vertreter des Standardmodells beeinflussen.

Um das Konzept virtueller Teilchen zu verstehen, muss man sich mit so genannten Feynman-Diagrammen beschäftigen (siehe nachfolgende Illustrationen). Der berühmte US-Physiker Richard Feynman hat sie erfunden, um die Zerfälle und Wechselwirkungen subatomarer Teilchen schematisch darzustellen und einfacher mit ihnen zu rechnen (mehr dazu in »Die seltsamen Zahlen der Teilchenkollisionen«, **Spektrum** August 2017, S. 66). Zwei Zerfälle eines Beauty-Hadrons sind dabei besonders aufschlussreich (man sollte sich nicht von den zunächst recht unhandlich wirkenden Mischungen aus Buchstaben und Symbolen abschrecken lassen).



In beiden Szenarien zerfällt ein so genanntes  $\bar{B}^0$ -Meson (gesprochen als »B null quer«; Antiteilchen werden meist mit einem horizontalen Strich über dem Teilchensymbol gekennzeichnet). Dieses Hadron besteht aus einem Beauty-Quark und einem Anti-Down-Quark. In den Feynman-Diagrammen läuft die Zeit von links nach rechts. Im ersten Beispiel zerfällt unser Ausgangsteilchen in ein positiv geladenes  $D^{*+}$ -Meson aus einem Charm- und einem Anti-Down-Quark sowie in ein negativ geladenes Tau-Lepton ( $\tau^-$ ) und ein Anti-Tau-Neutrino ( $\bar{\nu}_\tau$ ). Dieser Zerfall schreibt sich kurz als  $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$ . Das zweite Szenario,  $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$ , erzeugt ein  $\bar{K}^{*0}$ -Meson aus einem Strange- und einem Anti-Down-Quark sowie ein positiv geladenes Myon und dessen negativ geladenes Antiteilchen.

Das Gesetz der Energieerhaltung und die Äquivalenz von Masse und Energie (bekannt aus Einsteins berühmter Formel  $E = mc^2$ ) erfordern, dass alle beim Zerfall entstandenen Teilchen eine kleinere Gesamtmasse besitzen als das ursprüngliche B-Meson. Die Massendifferenz steckt

dann in der Bewegungsenergie der davonfliegenden Zerfallsprodukte.

Etwas Spannendes und zunächst Verblüffendes passiert dabei in der Mitte der Diagramme. Hier findet der Zerfall statt. Im ersten Prozess taucht dort ein W-Boson auf, eines der Überträgerpartikel der schwachen Wechselwirkung. Es entsteht an dem Punkt, wo sich ein Beauty- in ein Charm-Quark umwandelt, und zerfällt wenig später in ein Tau-Lepton und ein Anti-Tau-Neutrino. Die Überraschung steckt in der Masse des W-Bosons: Sie ist etwa 16-mal größer als die des ursprünglichen  $\bar{B}^0$ -Mesons! Warum verletzt das nicht die eiserne Regel der Energieerhaltung? Das liegt an den seltsamen Gesetzen der Quantenmechanik. Ein solcher Vorgang ist erlaubt, so lange er bloß schnell genug stattfindet. In einer derartigen Situation nennen Teilchenphysiker das W-Boson virtuell. Im Zerfall  $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$  ist das Prinzip ganz ähnlich, die Umwandlung läuft aber noch etwas komplizierter ab. Durch eine Schleifenstruktur verändert sich auf dem Weg vom Beauty- zum Strange-Quark an insgesamt drei Punkten etwas: Zusätzlich zu einem W-Boson tauchen hier noch weitere virtuelle Teilchen auf, ein Top-Quark und ein Z-Boson. Sie alle sind für sich genommen viel massereicher als das ursprüngliche Meson. So eigentümlich derartige Vorgänge klingen mögen – sie sind quantenmechanisch erlaubt und haben sich immer wieder in Experimenten gezeigt.

### Jeder nur denkbare Vorgang leistet einen kleinen, aber bedeutsamen Beitrag

Aus solchen Diagrammen lassen sich gemeinsam mit den zugehörigen mathematischen Regeln korrekt die Wahrscheinlichkeiten für die entsprechenden Zerfälle berechnen. Tatsächlich haben Physiker auf ähnliche Weise zum ersten Mal die Existenz des Charm- und des Top-Quarks vorhergesagt und deren Massen abgeschätzt.

Die beiden Diagramme sind nur zwei Varianten für diese spezielle Art von Zerfall. Es ist möglich, sich viele weitere Wege auszudenken, einige von ihnen mit nie zuvor gesehenen Teilchen auf Punkten irgendwo zwischen Anfangs- und Endzustand, oder sogar ganz neue Strategien, die Ausgangsteilchen mit denen am Schluss zu verbinden. Das Faszinierende daran: All diese theoretischen Optionen sind bedeutsam! Die Quantenmechanik lehrt uns, dass alles, was in der Natur passiert, von dem Nettobeitrag aller nur denkbaren Wege dorthin abhängt. Allerdings tragen dabei die einfachsten und offensichtlichsten Pfade am stärksten dazu bei. Bei hochgenauen Berechnungen zählt aber jeder einzelne Beitrag ein klein wenig. Anders ausgedrückt wirkt sich jedes überhaupt vorstellbare Teilchen selbst auf einen absolut gewöhnlichen Zerfall eines ganz konventionellen Mitglieds des Standardmodells aus. Wenn wir umgekehrt also bei den präzisen Messungen irgendeines Zerfalls auf etwas stoßen, das sich nicht mit den bekannten Zutaten und Rezepten erklären lässt, muss etwas Neuartiges im Spiel sein.

Auf genau diese Zusammenhänge setzt das LHCb bei der indirekten Suche nach neuer Physik. Unbekannte Teilchen würden virtuell zu jedem Zerfallsprozess beitragen. Darum ist es nicht unbedingt nötig, mit einem Be-





Von einem Kontrollraum aus überwachen Spezialisten das Experiment.

ALJASTAR PHILIP WIPFER

schleuniger die Energie zu ihrer direkten Erzeugung aufzubringen – wenn wir nur die richtigen Zerfälle mit hinreichender Präzision untersuchen, können wir im Prinzip sogar den Einfluss von Teilchen beobachten, die viel massereicher sind als bei ATLAS und CMS.

Am LHCb haben wir bereits erste Hinweise auf Unstimmigkeiten bei der Art und Weise gefunden, wie das Standardmodell die Zerfälle von Beauty-Hadronen beschreibt. Die Indizien stammen aus vielen unterschiedlichen Zerfällen, doch sie alle zeigen Gemeinsamkeiten. An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass das Standardmodell im Lauf weiterer Datenerhebungen und etwaiger theoretischer Verbesserungen durchaus noch in der Lage sein könnte, diese seltsamen Erscheinungen zu erklären. Doch selbst in dem Fall demonstrieren unsere Funde anschaulich, wie die Suche nach Rissen im Theoriegebäude funktioniert.

Bei dem ersten verdächtigen Vorgang geht es um den bereits beschriebenen Prozess  $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$ . Er verletzt möglicherweise eine Lepton-Universalität genannte Grundregel. Im Standardmodell zerfällt das W-Boson mit gleicher Wahrscheinlichkeit entweder in ein Tau-Lepton und sein Antineutrino oder in die entsprechenden Mitglieder der Myonen- beziehungsweise Elektronenfamilien (nachdem die Massenunterschiede rechnerisch herauskorrigiert wurden). Anders formuliert sollte der W-Zerfall für alle Leptonen einheitlich – universell – ablaufen. Am LHCb haben wir die Zerfälle in jeder Kategorie gezählt, mögliche Phänomene abgezogen, die solche Vorgänge vortäuschen könnten, und wir haben die Tatsache einberechnet, dass wir nicht alle Ereignisse erfassen. Unter dem Strich erhielten wir das verblüffende Ergebnis: Die Beauty-Hadronen zerfallen häufiger in Taus, als das Standardmodell vorhersagt.

Dieses Resultat ist allerdings noch kein schlagkräftiger Beweis, denn statistisch gesehen beträgt die Diskrepanz dabei gerade einmal zwei Sigma. Mit dieser auch Standardabweichung genannten Größe bezeichnen Wissenschaftler die Unsicherheit eines experimentellen Ergebnisses. Wegen statistischer Schwankungen sind Effekte mit

einer Diskrepanz von einem Sigma nicht ungewöhnlich. Physiker beginnen normalerweise erst bei drei Sigma aufzuhorchen, und erst bei einer Stärke von fünf Sigma verkünden sie in der Teilchenphysik eine Entdeckung. Darum sind unsere zwei Standardabweichungen eigentlich nicht der Rede wert – wären da nicht die Ergebnisse aus weiteren Experimenten.

### Viele Merkwürdigkeiten werden zu einem ausgewachsenen Problem

Wissenschaftler haben auch bei Versuchen in Kalifornien und Japan nach Verletzungen der Lepton-Universalität gesucht. Diese Experimente heißen BaBar beziehungsweise Belle; die entsprechenden Daten stammen aus der ersten Dekade des Jahrtausends. Dort entstanden ebenfalls bevorzugt Tau-Leptonen, sowohl beim gleichen Zerfall wie dem bei uns beobachteten als auch bei verwandten Prozessen. Außerdem haben wir am LHCb Anfang 2017 die Lepton-Universalität mit einer etwas anderen Technik vermessen, und auch hier stellten wir etwas mehr Taus fest als erwartet. Wenn man alle Experimente zusammenrechnet, erhält man eine Abweichung von vier Sigma. Das ist eine der deutlichsten Diskrepanzen vom Standardmodell in der gesamten Teilchenphysik und könnte sich als echtes Problem für die Theorie erweisen.

Was steckt dahinter? Die Theoretiker haben bereits einige Ideen. So könnte eine neue Form von geladenen Higgs-Teilchen beteiligt sein. Higgs-Bosonen halten sich nicht an die Lepton-Universalität und zerfallen bevorzugt in masse-

### Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



MICHAEL HOCH UND MAXIMILIEN BRICE, CERN

reiche Teilchen. Das könnte die Produktion von Taus begünstigen. Allerdings passen die Muster, die wir bei den Abweichungen beobachten, nicht besonders gut zu den einfacheren unter diesen Hypothesen. Alternativ gibt es noch eine etwas exotischere Erklärung, die auf einem »Leptoquark« beruht. Das hypothetische Teilchen gestattet Wechselwirkungen zwischen Quarks und Leptonen. Oder aber es handelt sich bei unserem Resultat schlicht um eine fehlerhafte Interpretation – vielleicht mischt sich ein anderes Signal in den Zerfall, das wir noch nicht ausreichend verstehen, um es gut genug herauszurechnen. Um dazwischen zu entscheiden, benötigen wir weitere Messungen. In den kommenden Jahren erhalten wir sowohl vom LHCb als auch von dem neu gestarteten Belle-II-Experiment mehr Daten.

Auch im zweiten bereits vorgestellten, etwas komplizierteren Zerfall  $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$  zeigen sich Hinweise auf unverstandene Vorgänge. Er ist ein hervorragendes Beispiel für Prozesse, in denen wir neue Physik finden könnten. Das liegt einerseits an der Schleifenstruktur im Feynman-Diagramm. Selbst Laien errahnen allein von dessen Anblick, dass man offenbar einige Verrenkungen braucht, um den Ablauf mit den Bausteinen des Standardmodells zu erklären. Vielleicht machen ihn neuartige Teilchen einfacher; darum würden sie sich hier auch schneller bemerkbar machen. Andererseits zeigen sich bei diesem Zerfall besonders viele gut messbare Eigenschaften. Unter anderem können wir die Rate bestimmen, mit dem er stattfindet, außerdem die Winkel und Energien der Zerfallsprodukte. Daraus können wir »Observablen« ableiten – charakteristische Messgrößen, die wir direkt mit den Vorhersagen des Standardmodells vergleichen können.

So ist  $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$  in vielerlei Hinsicht so etwas wie das Paradebeispiel für die Physik der Beauty-Teilchen. Zu dem Zerfall gab es bereits eine Unmenge theoretischer Untersuchungen, bevor der LHC überhaupt angeschaltet wurde. Allein griffige Namen für den Prozess und seine

Observablen fehlen noch. Der Held unserer Geschichte hört auf die wenig spektakuläre Bezeichnung  $P_5'$ .

Wir haben die Observable  $P_5'$  zum ersten Mal mit vorläufigen Daten des LHCb anhand der verschiedenen Richtungen und Energien der entstehenden Myonen untersucht. Bei einigen Konfigurationen gab es eine deutliche Abweichung zwischen den Vorhersagen und unseren Beobachtungen. Wegen dieser ersten Hinweise wartete die weltweite Gemeinde der Teilchenphysiker gespannt auf eine eingehendere Auswertung, die wir auf Basis des kompletten ersten Datensatzes einige Jahre später veröffentlichten. Die Anomalie war offenbar kein statistischer Ausreißer, sondern blieb bestehen. Inzwischen liegt die Stärke des Effekts bei 3,5 Sigma. Das reicht noch nicht aus, um den Champagner kalt zu stellen, lässt aber auf jeden Fall aufhorchen. Außerdem gibt es weitere Diskrepanzen bei anderen Observablen in ähnlichen Zerfallsprozessen. Rechnet man diese übrigen Funde zu  $P_5'$  hinzu, steigen die Abweichungen vom Standardmodell auf insgesamt 4,5 Sigma – darüber können wir nicht so einfach hinwegsehen.

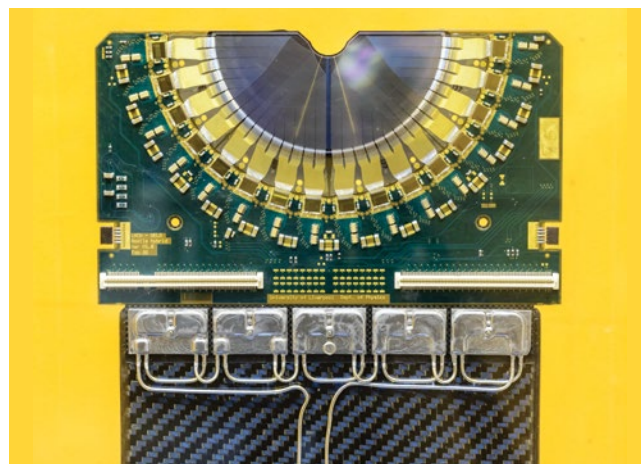
### Einige plausible Erklärungen stehen bereit – doch noch ist Vorsicht geboten

Entsprechend haben sich Theoretiker um Erklärungen bemüht. Das bereits erwähnte Leptoquark könnte eine Rolle spielen. Oder aber ein hypothetisches »Z-Strich-Boson« ist beteiligt.  $Z'$  könnte ein exotischer, schwerer Cousin des bereits bekannten Z-Bosons sein und auf besondere Weise in Quarks und Leptonen zerfallen (siehe Diagramme rechte Seite). Derartige Spekulationen müssen jedoch stets mit allen übrigen Messungen in Einklang sein. Beispielsweise dürfen sich die hypothetischen Teilchen nicht so verhalten, dass sie bereits im Lauf der direkten Messungen aufgetaucht wären.

Nun sind theoretische Physiker für ihren Erfindungsreichtum bekannt, und darum gibt es bereits eine Unmenge

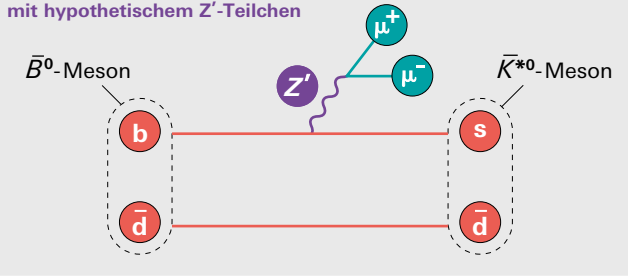


Leistungsfähige Rechner (links) verarbeiten die riesigen Datenmengen von den zahlreichen Detektorbauteilen. Dazu gehören halbkreisförmige Halbleiterchips (unten) direkt um den zentralen Teilchenstrahl.

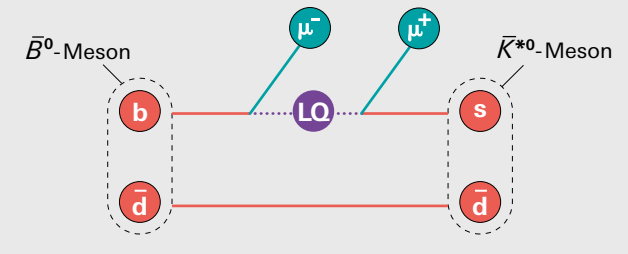




ZERFALLSSZENARIO 2A:  $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$   
mit hypothetischem  $Z'$ -Teilchen



ZERFALLSSZENARIO 2B:  $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$   
mit hypothetischem Leptoquark (LQ)



SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2017

plausibler Szenarien, die alle Kriterien erfüllen. Doch wir sollten vorsichtig sein. Einige Kollegen mahnen, die Vorhersagen des Standardmodells für die Observablen seien nicht gut genug verstanden, und die wirkliche Diskrepanz zwischen den Messungen und der Theorie könnte kleiner sein als gedacht. Insbesondere sind möglicherweise einige im Prinzip einfache, aber praktisch schwer zu berechnende Effekte der starken Wechselwirkung größer als vermutet.

Am LHCb ist noch ein dritter Typ von Rätsel aufgetaucht. Es hat mit den vorgestellten Beispielen einiges gemeinsam, könnte sich letztlich aber als besonders bedeutsam erweisen. Bei dem  $R_{K^*}$  genannten Verhältnis wird die Rate, in dem bei  $P_5'$  ein Beauty-Hadron in ein  $\bar{K}^{*0}$ -Meson, ein Myon und ein Antimyon zerfällt, mit der Rate eines ähnlichen Zerfalls verglichen, wo statt des Myonenpaares ein Elektron und ein Antielektron entstehen. Wir haben außerdem einen weiteren Quotienten berechnet,  $R_K$ . Hierbei geht es um den Vergleich zweier Zerfälle, wo statt des  $\bar{K}^{*0}$ -Mesons ein anderes Hadron auftaucht, das K-Meson.

Auch diese Tests betreffen die Lepton-Universalität, allerdings bei den ersten beiden Generationen, also den Elektronen und den Myonen. Die Vorhersage des Standardmodells ist einfach – die Rate der einzelnen Prozesse sollte praktisch identisch sein. Damit wären  $R_{K^*}$  und  $R_K$  jeweils etwa gleich eins. Die Messungen sind zwar knifflig, aber experimentell deutlich einfacher als bei den zuvor beschriebenen Prozessen. Wir erwarteten darum einen sehr sauberen und präzisen Test des Standardmodells; und wir gingen davon aus, hier die Erhaltung der Lepton-Universalität festzustellen. Wir irrten uns.

Zunächst wagten wir uns an die Untersuchung von  $R_K$  und erhielten einen sehr niedrigen Wert von 0,75. Er wich um 2,6 Sigma von der theoretischen Erwartung ab, was uns extrem neugierig auf die Messung von  $R_{K^*}$  machte. Damit waren wir Anfang 2017 fertig, und das Ergebnis sah ähnlich aus: 0,69, mit einer Abweichung von 2,5 Sigma

vom Standardmodell. Freilich könnte es sich in beiden Fällen um statistische Schwankungen handeln, doch da wir die Anomalie in zwei verschiedenen und obendrein technisch relativ unproblematischen Messungen erhielten, erfährt sie einige Aufmerksamkeit in der Physikergemeinde.

Angenommen, die Werte treffen zu, dann bevorzugt die Natur den Zerfall in Elektronen gegenüber dem in Myonen. Die wahrscheinlichen Schuldigen wären auch in diesen Fällen entweder Leptoquarks oder  $Z'$ -Bosonen. Es scheint dabei, als würden zu wenige Myonen produziert, während sich die Elektronen eher an das Drehbuch des Standardmodells halten. Welcher Mechanismus auch immer dahintersteht, er könnte nicht nur die seltsamen Werte für  $R_K$  und  $R_{K^*}$  begründen, sondern praktischerweise ebenso die Diskrepanz bei  $P_5'$ . Einige besonders eifrige Theoretiker wollen in einem Aufwasch sogar den Zerfall  $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$  erklären. Allerdings erscheint ein Teilchen, das alle drei Wünsche auf einmal erfüllt, etwas viel verlangt.

Jedenfalls werden wir bald wissen, ob hinter  $R_K$  und  $R_{K^*}$  mehr steckt. Mit den zusätzlichen Daten aus der im November 2017 abgeschlossenen Experimentierphase des LHC wird sich hoffentlich zeigen, ob die Unterschiede statistisch betrachtet bedeutsamer werden und sich zu einer physikalischen Sensation auswachsen oder ob sie wieder verschwinden.

Bei den hier beschriebenen vorläufigen Ergebnissen handelt es sich lediglich um einige der wichtigsten aus einer ganzen Fülle von interessanten Messungen aus der Physik der Beauty-Hadronen. Viele Kollegen sind davon geradezu elektrisiert, und das mit Recht. Doch wer schon länger dabei ist und andere Experimente miterlebt hat, hat solche spannenden Ausreißer schon oft kommen und wieder gehen sehen.

Was würde es bedeuten, sollte eine der beschriebenen Anomalien dem Standardmodell eindeutig widersprechen? Das wäre sicherlich die wichtigste Entwicklung auf dem Gebiet seit Jahrzehnten und gäbe uns Einblicke in etwas, das uns jenseits der bekannten Regeln unseres Universums erwartet. Die anschließende Suche nach den tiefer liegenden Gesetzen würde davon abhängen, um welches Teilchen es sich handelt, sei es ein exotisches Higgs, ein Leptoquark, ein  $Z'$ -Boson oder etwas komplett anderes. Weitere Zerfälle dürften zusätzliche Indizien liefern; und sollte die Energie des potenziellen neuen Teilchens nicht allzu hoch sein, würden sich wohl direkte Suchen an den anderen Experimenten des LHC oder zukünftigen Beschleunigeranlagen anschließen.

Die Möglichkeiten des LHCb sind enorm vielversprechend, egal, wie lang der Weg zu neuer Physik letztlich sein wird. Galileo Galileis Motto lautete angeblich: »Miss, was messbar ist, und alles Übrige mach messbar.« Für das LHCb könnten wir keinen besseren Wahlspruch haben. ◀

QUELLEN

Archilli, F. et al.: Flavour-Changing Neutral Currents Making and Breaking the Standard Model. In: Nature 546, S. 221–226, 2017

Ciezarek, G. et al.: A Challenge to Lepton Universality in B-Meson Decays. In: Nature 546, S. 227–233, 2017

## NATURSTOFFCHEMIE VON GRÜN ZU BLAU: WELLENSITTICHFÄRBUNG ENTSCHLÜSSELT

**Psittacofulvine verleihen zahlreichen Papageienarten ein auffälliges Gefieder. Wie die Vögel diese gelben und roten Pigmente bilden, war bislang unbekannt. Zudem rätselten Forscher über die genetische Ursache blauer Federn bei Wellensittichen. Nun ist klar: Der Farbschlag beruht auf der Punktmutation eines Schlüsselgens.**

▶ Grünes Federkleid und gelber Kopf – so präsentiert sich die Wildform der in Australien heimischen Wellensittiche (*Melopsittacus undulatus*). Erst als Vogelhalter angingen, gezielt neue Farbvarianten zu züchten, entstand vor etwa 130 Jahren die heute im Zoohandel angebotene blau-weiße Form. Diese kann das gelbe Pigment der Wildform, ein so genanntes Psittacofulvin, nicht bilden. Das Blau ihrer Federn ist eine Strukturfarbe, die aus der Streuung von Licht in unpigmentierten Zellen und anschließender Interferenz (Überlagerung) unterschiedlicher Wellenlängen resultiert. Bei der Wildform mischen sich die blaue Strukturfarbe und das gelbe Pigment zu grün. Blau-weiß sind lediglich Wellensittiche mit einer doppelt defekten Erbanlage für die Psittacofulvin-Synthese. Geben die Eltern wenigstens ein intaktes Gen dafür an ihre Nachkommen weiter, können Letztere das Pigment in ausreichender Menge produzieren und erscheinen grün-gelb.

Psittacofulvine, die sich nicht nur bei Wellensittichen, sondern auch bei zahlreichen anderen Vertretern der Papageienfamilie finden, gehören zur Klasse der linearen konjugierten Polyene: kettenförmige Kohlenwasserstoffmoleküle, in denen sich Doppel- und Einfachbindungen abwechseln. Auf diesem Bindungsmuster basiert die

Lichtabsorption, die den Vögeln – je nach genauer Molekülstruktur – ihre gelbe oder rote Farbe verleiht. Damit ähneln diese Pigmente den Karotinoiden, die bei vielen gefiederten Tieren ebenfalls für Farbe sorgen. Doch während Karotinoide immer mit der Nahrung aufgenommen werden, etwa von Flamingos beim Verzehr winziger Krebse, stellen Papageien Psittacofulvine selbst her. Wie sie diese im Tierreich wenig verbreit-

teten Naturstoffe bilden und welche Enzyme daran beteiligt sind, war bislang allerdings unbekannt.

Einem Team US-amerikanischer Biochemiker und Molekularbiologen um Thomas Cooke von der Stanford University gelang es nun, die Psittacofulvin-Synthese zu entschlüsseln und das Geheimnis der Wellensittichfärbung zu lüften. In der DNA von mehr als 200 Individuen der Wild- und Zuchtform suchten sie nach Variationen einzelner Basenpaare (Einzelnukleotid-Polymorphismen), die zusammen mit der Blaufärbung vererbt werden. Auf diese Weise konnten die Forscher den Ort des Gens, das den Farbwechsel verursacht, auf einen bestimmten Bereich im Erbgut einengen. Dieser enthielt elf mutmaßliche Gene, von denen vor allem eines Aufmerksamkeit erregte: Der Abschnitt kodiert eine so genannte Polyketidsynthase namens MuPKS. Die Enzyme aus der Proteinfamilie der Polyketidsynthasen sind an der Biosynthese vielfältiger Naturstoffe in Pflanzen und Mikroorganismen beteiligt. Zu ihrem breiten Repertoire gehören beispielsweise verschiedene Farb- und Geschmacksstoffe sowie antibiotisch wirksame Verbindungen wie Erythromycin und Tetracyclin. Darüber hinaus synthetisieren einige dieser Enzyme Pigmente, deren chemische Struktur der Architektur von Psittacofulvinen ähnelt. MuPKS war also ein heißer Kandidat für das Schlüsselprotein der Gefiederfärbung von Wellensittichen.

### Ein Basenaustausch legt das katalytische Zentrum eines Stoffwechselproteins lahm

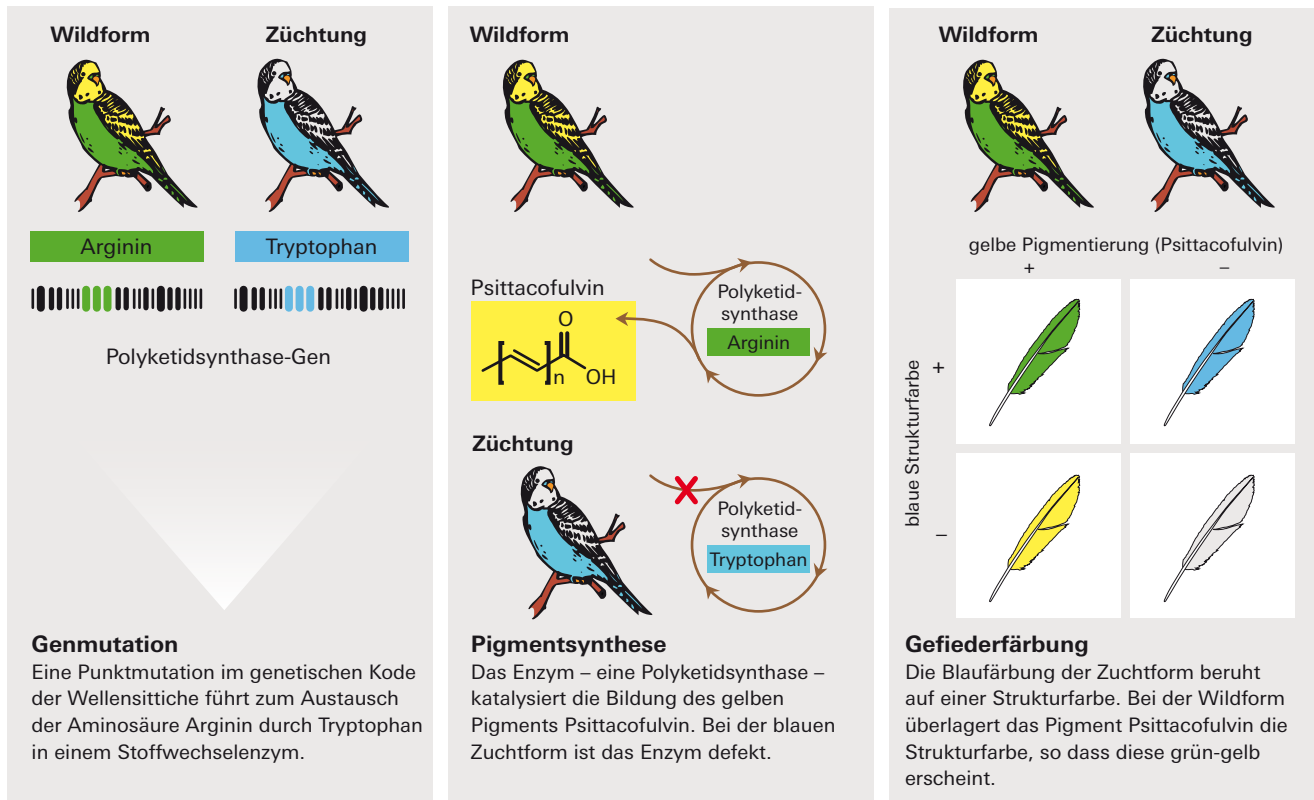
Als die Wissenschaftler nach weiteren Indizien dafür suchten, dass MuPKS an der Pigmentbildung beteiligt ist, stellten sie eine besonders hohe Genexpression für den entsprechenden DNA-Abschnitt an den Spitzen nachwachsender Wellensittichfedern fest. Gleichzeitig fanden sie keine Unterschiede zwischen grün-gelben und blau-weißen Vögeln beim Umschreiben des *MuPKS*-Gens in Boten-RNA – der Blaupause für die Proteinherstellung. Wenn aber Wild- und Zuchtform die für die Färbung vermeintlich ausschlaggebende Polyketidsynthase gleichermaßen produzieren, worauf beruht dann ihr unterschiedliches Federkleid?

Den entscheidenden Hinweis lieferte ein paarweiser Abgleich der DNA-Basensequenz beider Farbtypen. Er zeigte, dass über die gesamte Länge des *MuPKS*-Gens genau eine Stelle existiert, an der eine andere Base in der Abfolge zum Austausch einer Aminosäure führt: Tryptophan an Stelle von Arginin. Die Entdeckung dieses Einzelnukleotid-Polymorphismus war insofern bemerkenswert, als das Arginin just in jenem Bereich liegt, der bei anderen Polyketidsynthasen das katalytische Zentrum des Enzyms bildet. Ersetzt man das Arginin, ein Molekül mit einer positiv geladenen Seitenkette, durch die unpolare Aminosäure Tryptophan, verliert das Enzym seine Funktionalität. Während alle blau-weißen Wellensittiche zwei Gene der Tryptophan-Variante von MuPKS hatten, trugen grün-gelbe Vögel entweder nur die Arginin-Variante oder von jeder Ausführung ein Exemplar – das passte zur





## Ein Buchstabe macht blau



Es genügt, dass sich lediglich ein bestimmter Buchstabe in der Basenabfolge der Wellensittich-DNA ändert, und schon werden aus grün-gelben Vögeln durch den Defekt eines Schlüsselproteins blau-weiße.

bereits bekannten rezessiven Vererbung des blauen Farbmerkmals.

Den endgültigen Beweis für die Schlüsselfunktion der Polyketidsynthase bei der Pigmentbildung lieferten die Forscher, indem sie das *MuPKS*-Gen der Wellensittiche in die DNA von Hefezellen einschleusten. Auch wenn diese federlos sind, verfügen sie doch über die molekularen Werkzeuge, um die fremde Sequenz abzulesen und in funktionsfähige Proteine übersetzen zu können. Und tatsächlich erzeugten die Hefen mit der *MuPKS* des Arginin-Typs gelbes Psittacofulvin, jene mit der Tryptophan-Variante hingegen kein Pigment: Der Austausch einer Aminosäure führte wie vermutet zum Ausfall des Enzyms, das die Herstellung des Farbmittels katalysiert.

Abgesehen von der allgegenwärtigen Fettsäuresynthase waren Polyketidsynthasen bislang fast ausschließlich bei Bakterien und Pflanzen bekannt. Eine der wenigen Ausnahmen im Tierreich ist eine mit der *MuPKS* verwandte Synthase bei Seeigeln, die ein rotes Pigment namens Echinochrom-A bildet. Die Wissenschaftler durchforsteten daher das Erbgut mehrzelliger Organismen nach weiteren Polyketidsynthasen. Und sie wurden fündig: Im Genom diverser Wirbeltiere – darunter Vögel, Krokodile, Schlangen, Eidechsen und Fische – entdeckten sie bis

dahin unbeachtete Gene, deren Sequenzen der *MuPKS* in Wellensittichen ähneln. Auch die DNA von Hühnern kodiert eine Polyketidsynthase, die nachweislich Psittacofulvin produzieren kann. Unklar ist aber, ob das Pigment bei diesen Tieren überhaupt eine Rolle spielt. Einzig für ein verwandtes Gen (*OIPKS*) Japanischer Reiskärpflinge steht die Funktion fest: Ohne es können die Fische für den Gehörsinn wichtige Steinchen (Otolithen) nicht bilden. Die Erforschung der Polyketidsynthasen dürfte also noch so manche überraschende Funktion im Tierreich zu Tage fördern. ◀

**Annette Hille-Rehfeld** ist promovierte Biologin und Autorin in Stuttgart.

QUELLE

**Cooke, T.F. et al.:** Genetic Mapping and Biochemical Basis of Yellow Feather Pigmentation in Budgerigars. In: Cell 171, S. 427-439, 2017



## KREBSMEDIZIN MIT SALMONELLEN GEGEN TUMOREN

**Maßgeschneiderte Darmbakterien, die sich in Krebsgewebe ansammeln, locken Immunzellen herbei und stacheln sie mit einem speziellen Protein zum Angriff an.**

► Zu den Aufgaben des Immunsystems zählt neben der Bekämpfung von Krankheitserregern auch das Beseitigen entarteter Zellen. Letzteres gelingt den Abwehrkräften allerdings oft nur unzureichend, weil sich die körpereigenen kranken Zellen äußerlich relativ wenig von gesunden unterscheiden. Zudem präsentieren Krebszellen in der Regel auf ihrer Oberfläche spezielle Stoppsignale gegen Immunangriffe. Das Potenzial des Abwehrsystems versuchen Mediziner trotzdem zu nutzen. Eine Immuntherapie hätte verglichen mit einer klassischen Chemotherapie weniger Nebenwirkungen, weil gesundes Gewebe dabei weitgehend verschont bliebe. Bei vielen Studien dazu werden zuvor »blinde« Abwehrzellen so verändert, dass sie Entartetes nun erkennen und gezielt ausschalten.

Eine andere Strategie, um die Immunkräfte gegen Krebsgeschwülste zu mobilisieren, verfolgt ein Wissenschaftlerteam um die südkoreanischen Forscher Jin Hai Zheng und Jung-Joon Min. Die Gruppe setzt auf maßgeschneiderte Darmbakterien. Diese sollen sich im Tumor ansammeln und dort ein bestimmtes Protein abgeben – welches das Immunsystem als körperfremd erkennt. Daraufhin wird die Abwehr aktiv und attackiert den umliegenden Zellverband: Die Wucherung schrumpft.

Das hierfür ausgewählte Bakterium *Salmonella* Typhimurium (ein Serotyp von *S. enterica*) ist ein Hauptverursa-

### Sie reichern sich in Krebsgeschwülsten an und verschonen gesunde Organe

cher von Brechdurchfällen, umgangssprachlich Magen-Darm-Grippe. Da Salmonellen am besten in einer sauerstoffarmen Umgebung gedeihen, können sie sich auch in Krebsgeschwülsten gut vermehren, deren Inneres normalerweise schlecht mit Sauerstoff versorgt wird. Aus diesem Grund pflegen sie sich in Krebstumoren anzureichern, wenn man sie etwa Versuchstieren injiziert. Die gesunden Organe bleiben dagegen praktisch frei von ihnen.

Dass Salmonellen das Tumorwachstum zu einem gewissen Grad unterdrücken können, wissen Mediziner schon länger. Ebenso ist bekannt, dass sich diese Mikroben als Vehikel eignen, um mit ihrer Hilfe in Krebsgewebe chemotherapeutische Wirkstoffe einzuschleusen oder dort Botenstoffe verfügbar zu machen, die das Immunsystem aktivieren. Die koreanischen Wissenschaftler ersannen

jetzt einen anderen Trick. Sie statteten die Darmmikroben mit der genetischen Information für ein Protein namens Flagellin aus, das den Hauptbestandteil des propellerartigen Bewegungsapparats eines anderen Bakteriums, *Vibrio vulnificus*, darstellt.

Weil Flagellin starke Immunreaktionen auslöst, verursacht dieser Erreger Entzündungen des Unterhautgewebes und Blutvergiftungen. Wenn nun die manipulierten Salmonellen in einem Tumor Flagellin ausschütten, wird dadurch das angeborene Immunsystem aktiviert, zu dem die als Fresszellen bezeichneten Makrophagen und neutrophilen Granulozyten zählen. Wichtig für diese Studie: Beide Zelltypen sind nicht nur für das rasche Erkennen und Zerstören von eingedrungenen Mikroorganismen zuständig, sondern auch dafür, krankhaft veränderte Zellen aufzuspüren und zu vernichten. Außerdem produzieren sie entzündungsfördernde Botenstoffe, welche die körpereigene Abwehr zusätzlich mobilisieren.

### Beim größeren Teil der Versuchstiere verschwand der Krebs vollständig

Um herauszufinden, wie wirkungsvoll ihr Trick ist, verpflanzten die Forscher zunächst Darmkrebszellen in die Flanken von Mäusen, worauf an den Stellen erwartungsgemäß Wucherungen entstanden. Dann verabreichte man den Nagern die hochgerüsteten, aber noch »unscharf« gehaltenen Salmonellen ins Blut, die sich wie gewünscht schon nach wenigen Tagen in den Tumoren konzentrierten. Erst jetzt setzten die Wissenschaftler durch Zugabe eines Zuckers die Produktion von Flagellin in Gang. Tatsächlich verschwanden daraufhin bei mehr als der Hälfte der Tiere die Krebsgeschwülste vollständig. Noch mehr als vier Monate später, als die Beobachtung endete, waren sie allem Anschein nach krebsfrei.

Flagellin allein, direkt ins Tumorgewebe gespritzt, hatte dagegen keinerlei günstige Wirkung. Offensichtlich trugen demnach auch die Salmonellen selbst zur Heilung bei. Verabreichte man den Mäusen mit Krebs nämlich reines Flagellin und dazu Salmonellen ohne die spezielle genetische Waffe, dann bildeten sich deren Geschwülste ebenfalls zurück. Allerdings war dieses Verfahren nicht nachhaltig: Nach Ende der Behandlung setzte das Krebswachstum bald wieder ein.

In anderen Versuchen, bei denen die Forscher menschliche Darmkrebszellen in die Darmwand von Mäusen gepflanzt hatten, unterdrückten injizierte Salmonellen mit aktivem Flagellin-Gen sogar weitgehend die Bildung von Metastasen. Ein ähnliches Ergebnis erzielten die Wissenschaftler in einer Tierstudie zu schwarzem Hautkrebs. Sie hatten bei diesen Untersuchungen Labormäuse verwendet, denen wichtige Bestandteile des adaptiven Immunsystems fehlten, die T-Lymphozyten. Diese zerstören entweder kranke oder entartete Zellen direkt oder schlagen mit Botenstoffen Alarm. Da die T-Zellen fehlten, mussten die festgestellten günstigen Effekte mit einer Aktivierung des angeborenen Immunsystems in der Tumorumgebung zusammenhängen.



**Spektrum**  
der Wissenschaft

# KOMPAKT

Jetzt bei Ihrem  
Zeitschriftenhändler!



**Spektrum**  
der Wissenschaft

01.18

# KOMPAKT

## MOTIVATION UND KREATIVITÄT

5,90 € (DADL) & 50 Pf.  
WWW.SPEKTRUM.DE

**Lust und Last**  
Den inneren Antrieb mobilisieren

**Aktiv sein**  
Komm in den Flow

**Nudging**  
Der kleine Stups zu mehr Vernunft

Print | 5,90 €  
Download | 4,99 €

[www.spektrum.de/aktion/motivation](http://www.spektrum.de/aktion/motivation)

Wie sich herausstellte, beruhte die Anti-Krebs-Wirkung auf einem zweistufigen Vorgang. Zuerst bewirkte allein die Anwesenheit der maßgeschneiderten Salmonellen im Tumor, dass Makrophagen und neutrophile Granulozyten einwanderten und aktiviert wurden. Denn diese Immunzellen tragen außen spezielle Erkennungsmoleküle für Bestandteile von Bakterien. Einmal angelockt, stimulierte sie das von den Salmonellen freigesetzte Flagellin zusätzlich – das für sie ja ebenfalls ein Fremdkörper war. Auch dieses Protein bindet sich an ein Rezeptormolekül auf ihrer Oberfläche, was wiederum bewirkte, dass die Immunzellen entzündungsfördernde Botenstoffe ausschütteten sowie toxische Substanzen produzierten, welche die Krebszellen vernichteten.

Vor der Umsetzung dieses Verfahrens für menschliche Patienten sind jedoch Einschränkungen zu berücksichtigen. Weltweit hatte etwa jede fünfte Person schon Kontakt mit Salmonellen und erwarb dadurch eine Immunität,

## Trotz Immunität lösen veränderte Bakterien eine starke Abwehrreaktion aus

die den Behandlungserfolg herabsetzen kann. Doch auch dafür suchen Forscher schon nach Gegenmaßnahmen. Mitarbeiter des Helmholtz-Zentrums für Infektionsforschung in Braunschweig um Sebastian Felgner und Siegfried Weiß veränderten gezielt die Zellhülle von *Salmonella* Thyphimurium in einer Weise, dass die Bakterien bei Versuchstieren trotz vorhandener Immunität eine starke Abwehrreaktion auslösten und die Immunzellen wirksam den Krebs bekämpften.

Ebenso sind Sicherheitskriterien bei einer Anwendung am Menschen entscheidend. Vor allem dürfen provozierte Immunattacken gesunde Organe und Gewebe nicht massiv schädigen. Die koreanischen Forscher schalteten deswegen bei den Mäusen das Gen für Flagellin erst nach drei Tagen an, als sich die Salmonellen bereits in den Tumoren angereichert hatten. Da waren Leber und Milz bereits fast frei von den Bakterien, und deutliche Organschädigungen oder andere gefährliche Nebenwirkungen traten später nicht auf. Ob sich eine Therapie beim Menschen in ähnlicher Weise gezielt steuern ließe, bleibt zu klären. Im Erfolgsfall könnte hoffentlich bald ein mächtiges Werkzeug gegen bestimmte Krebsarten zur Verfügung stehen. ◀

**Larissa Tetsch** ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Maisach bei München.

### QUELLEN

**Felgner, S. et al.:** Engineered *Salmonella enterica* Serovar Typhimurium Overcomes Limitations of Anti-Bacterial Immunity in Bacteria-Mediated Tumor Therapy. In: *Oncol Immunology*, e1382791, 2017

**Zheng, J. H. et al.:** Two-Step Enhanced Cancer Immunotherapy with Engineered *Salmonella typhimurium* Secreting Heterologous Flagellin. In: *Science Translational Medicine* 9, eaak9537, 2017

## ASTRONOMIE HEAVY-METAL- HYPERNOVA

**Die »Hypernova« SN 2017egm war weit leuchtstärker als eine normale Sternexplosion. Ihre Umgebung in einer fernen Spiralgalaxie ähnlich unserer Milchstraße war für diese Art von Super-Supernova untypisch. Das hilft Forschern dabei, die möglichen Ursachen für das ungewöhnliche Spektakel einzugrenzen.**

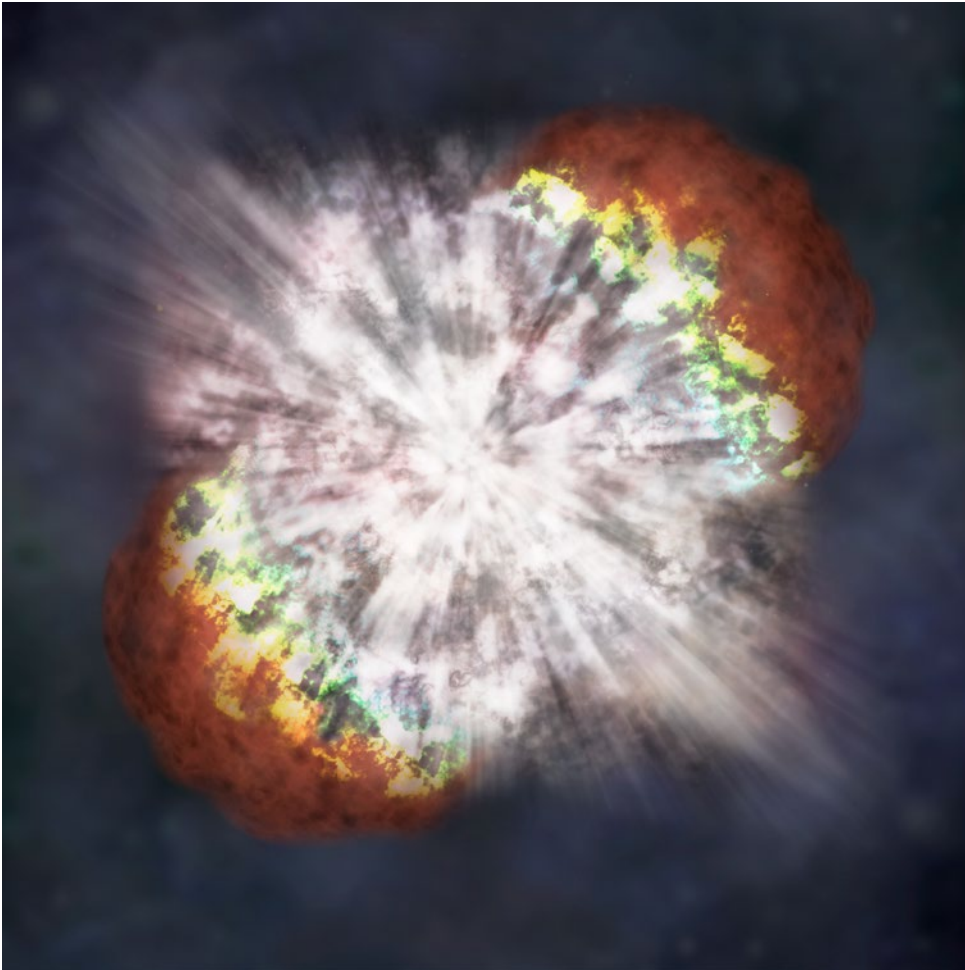
Sehr massereiche Sterne beenden ihr Leben spektakulär mit einer Explosion als Supernova. Sie erzeugt im Lauf einiger Wochen mehr Licht als hunderte Milliarden Sterne einer Galaxie. Deshalb beobachteten Astronomen Supernovae auch noch in sehr weit entfernten Galaxien – in den vergangenen Jahren haben sie so Tausende gefunden. Einige davon ragen heraus: Rund 50 so genannte superleuchtkräftige Supernovae (englisch: superluminous supernovae, SLSN) oder Hypernovae waren nochmals rund 100-mal heller als normale Vertreter ihrer Art. Die möglichen Gründe dafür sind umstritten. Ein besonderes Exemplar könnte nun helfen, das Rätsel zu lösen.

Die Hypernova SN 2017egm wurde am 23. Mai 2017 vom europäischen Gaia-Satelliten entdeckt. Nur wenige Tage später konnten chinesische Astronomen ein erstes Spektrum aufzeichnen, früher als bei jeder anderen Supernova dieses Typs. Die gemessene Farbtemperatur betrug demnach rund 15 000 Kelvin, das heißt, die Supernova strahlte im extrem blauen Licht. Das ist ebenso wie die große Leuchtkraft charakteristisch für eine Hypernova. SN 2017egm erreichte eine absolute Helligkeit von fast 21 Magnituden. Würde so ein Ereignis in der Milchstraße stattfinden, könnte es uns weit heller als der Vollmond am Himmel erscheinen.

Die Heimatgalaxie von SN 2017egm ist NGC 3191, eine mit größeren Amateurfernrohren gerade noch sichtbare Galaxie im Sternbild Große Bärin. NGC 3191 ist rund 420 Millionen Lichtjahre von unserem Sonnensystem entfernt. Das ist zwar eine gewaltige Distanz, im Vergleich aller je gesichteten Hypernovae liegt SN 2017egm aber dreimal näher als der bisherige Rekordhalter. Bereits das hilft den Astronomen ungemein, denn je weniger weit eine Supernova entfernt ist, desto heller erscheint sie auf den Teleskopbildern und desto besser und aussagekräftiger sind die Messungen ihres Lichts. Insbesondere die Spektren verraten den Forschern viel über die Natur des Objekts.

Die große Überraschung bei dieser Hypernova: NGC 3191 ist eine Spiralgalaxie wie unsere Milchstraße. Solche Galaxien besitzen viel Masse und eine klare Struktur – ein dichter Kernbereich ist von einer Scheibe aus Gas und Sternen umgeben, in der sich Spiralarme ausbil-





Bei einer Hypernova schleudert ein explodierender massereicher Stern Material nach außen (in der Illustration weiß dargestellt). Dieses trifft auf kaltes, zuvor ausgestoßenes Gas (rot), erhitzt es und erzeugt so leuchtende Stoßfronten (grün, blau, gelb).

den. In diesen Armen bilden sich ständig neue Sterne, und man hat in Spiralgalaxien schon sehr viele Supernovae gesehen. Eine Hypernova ist dort jedoch ein ganz außergewöhnliches Ereignis.

#### Das Ereignis beweist: Hypernovae leuchten auch in Galaxien mit schwereren Elementen

Hypernovae leuchteten bislang fast nur in massearmen, kleinen Zwerggalaxien auf. Hier entstehen weit weniger Sterne und somit kaum schwere Elemente. Astronomen sprechen von metallarmen Galaxien, wobei sie alles als Metall bezeichnen, was schwerer ist als Wasserstoff und Helium. NGC 3191 und die Milchstraße sind in diesem Sinn metallreich. SN 2017egm beweist nun, dass Hypernovae auch in metallreicher Umgebung explodieren. Das könnte helfen zu erklären, warum sie und ihresgleichen so viel heller strahlen als normale Supernovae.

Eine entsprechende Untersuchung eines Teams um Matt Nicholl vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics im US-amerikanischen Cambridge unterstützt das derzeit gängigste Erklärungsmodell für Hypernovae. Dem zufolge übernimmt der dichte, kurz zuvor in sich zusammengestürzte Kern des ehemaligen Riesensterns die

Rolle des Motors und verleiht der Explosion zusätzliche Energie.

Bei einer normalen Supernova (genauer: einer vom »Typ II«) kollabiert der innerste Bereich des Sterns zu einem Neutronenstern oder sogar zu einem Schwarzen Loch. Ein Neutronenstern ist im Prinzip ein Gebilde mit der Dichte eines Atomkerns von 10 bis 20 Kilometern Größe. Bei seiner Entstehung wird auch das Magnetfeld des Sterns kompakter; der Neutronenstern zieht das Feld gewissermaßen mit sich selbst zusammen und verstärkt es dabei. Gleichzeitig steigt auf Grund der Drehimpulserhaltung die Rotationsgeschwindigkeit des Sternüberrests. Dieser Effekt ist von Eisläufern bekannt, die immer schnellere Pirouetten drehen, je enger sie ihre Arme zum Körper ziehen.

Im Fall der Hypernova könnte dieser Prozess ins Extreme gesteigert sein. Der Neutronenstern hat dann ein vielfach höheres Magnetfeld und bekommt einen speziellen Namen: Magnetar. Das starke Feld des raschen Magnetars, gepaart mit seiner intensiveren Drehung um die eigene Achse, liefert dann zusätzliche Energie, welche die expandierenden Explosionswolken weiter aufheizt und damit heller erscheinen lässt. Tatsächlich konnten Nicholl

und seine Kollegen zeigen, dass das Modell das Verhalten von 38 früher beobachteten Supernovae gut beschreibt. Auch SN 2017egm passt in das Schema. Sie ist offenbar ein ganz normaler Vertreter ihrer Klasse – trotz ihrer ungewöhnlichen Lage in einer metallreichen Galaxie. Diese Tatsache bestätigt das Magnetar-Modell zusätzlich, schreiben die Autoren. Denn es macht keine wesentlichen Unterschiede zwischen metallarmer und metallreicher Umgebung.

Und dennoch ist SN 2017egm ein Sonderfall. Noch ist unbekannt, warum Super-Supernovae bevorzugt in metallarmen Galaxien aufleuchten. Immerhin haben Nicholl und seine Kollegen einige gute Ideen. Der wahrscheinlichste Grund dafür ist wohl, dass sich metallarme Sterne anders entwickeln als solche, die einen ähnlichen Metallgehalt besitzen wie die Sonne. So könnte in ersteren ein größerer Volumenanteil an der Kernfusion teilnehmen, nicht nur der innerste Bereich. Dadurch würden sie größere und massereichere Kerne ausbilden. Auch verlieren sie womöglich weniger Material auf Grund von Sternwinden, wodurch sie nicht so viel Drehimpuls abgeben und

## Die Super-Supernova ist trotz ihrer ungewöhnlichen Lage offenbar ein ganz normaler Vertreter ihrer Klasse

daher bis kurz vor der Explosion schneller rotieren. Diese Rotationsenergie würde dann die Supernova zusätzlich befeuern.

Beobachtet man eine Supernova nur lange genug, lassen sich diese Hypothesen mit etwas Glück testen. Die Explosionswolke durchdringt nämlich nach einiger Zeit das zu früheren Zeiten von den Sternwinden abgeblasene langsamere Material und bringt es zum Leuchten (siehe Bild S. 25). Bei der nächstgelegenen Supernova der letzten Jahrhunderte, SN 1987A in der Großen Magellanschen Wolke, verfolgen die Astronomen den Prozess noch heute. So lernen sie Stück für Stück die Vergangenheit des ehemaligen Riesensterns kennen. Auf ähnliche Daten hoffen die Forscher auch im Fall von SN 2017egm. Dank ihrer relativen Nähe dürfte sie rund zwei Jahre lang sichtbar bleiben und dazu beitragen, den Entstehungsmechanismus der gewaltigsten aller Sternexplosionen aufzuklären. ◀

**Jan Hattenbach** ist Astronom und Wissenschaftsjournalist auf La Palma.

### QUELLEN

**Nicholl, M. et al.:** The Superluminous Supernova SN 2017egm in the Nearby Galaxy NGC 3191: A Metal-Rich Environment Can Support a Typical SLSN Evolution. In: The Astrophysical Journal Letters 845, L8, 2017

**Nicholl, M. et al.:** The Magnetar Model for Type I Superluminous Supernovae I: Bayesian Analysis of the Full Multicolour Light Curve Sample with MOSFiT. In: The Astrophysical Journal 850, 55, 2017

## KLIMAWANDEL KORALLEN TROTZEN OZEANERWÄRMUNG

**Steigende Wassertemperaturen bedrohen die Riffe der Tropen und Subtropen. Die Korallen im nördlichen Roten Meer jedoch beeindruckt der Klimawandel bislang kaum – obwohl sich das Wasser hier besonders schnell aufheizt.**

▶ Von 2014 bis 2016 ereignete sich die bisher längste dokumentierte Massenkoralenbleiche. Das wiederkehrende Klimaphänomen El Niño sorgte für eine ungewöhnlich starke Erwärmung des Ozeans, mehr als 40 Prozent aller Riffe weltweit litten unter Hitzestress. Hartkorallen, deren Kalkskelette die Basis eines jeden Riffs bilden, starben großflächig, weil die Polypen auf Grund der hohen Temperaturen für sie lebenswichtige Untermieter – so genannte Zooxanthellen – hinauswarfen. Die symbiontischen Mikroalgen versorgen ihren Wirt mit Zucker sowie anderen organischen Molekülen und verleihen den Korallen ihre Farbe. Ein leichter Farbverlust während der heißesten Monate im Jahr ist nicht ungewöhnlich, und oft erholen sich die Korallen, sobald das Meerwasser wieder abkühlt. Übersteigen die Temperaturen den Toleranzbereich der Korallen allerdings dauerhaft, ist die Bleiche irreversibel und kann zum Kollaps ganzer Riff-Ökosysteme führen.

Der jüngste El Niño wirkte auch deswegen so verheerend, weil die Wassertemperatur vielerorts bereits ohne diese Klima-anomalie einen für Hartkorallen kritischen Schwellenwert erreicht. Schuld ist der Treibhauseffekt des weiterhin steigenden CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre. Eine aktuelle Auswertung von Satellitendaten zeigt, dass sich der Ozean an der Oberfläche seit Mitte der 1980er Jahre pro Dekade um zirka 0,1 Grad Celsius erwärmt hat – Regionen wie die Karibik, der Indopazifik oder das Great-Barrier-Riff gar doppelt so stark. Forscher schätzen, dass in den letzten 30 Jahren gut 80 Prozent der globalen Riffe mehrfach Temperaturen ausgesetzt waren, die wenigstens ein Grad Celsius über dem gemittelten langjährigen Maximum lagen. Hält dieser Wärmestress über Wochen an, werden aus farbenfrohen Unterwassergärten oft monotone Friedhofslandschaften. Bis 2050, so die Prognose, werden nahezu sämtliche Warmwasserkorallen jährliche Hitzewellen erleben. Darüber hinaus erschwert ihnen die Ozeanversauerung die Kalkbildung (Kalzifizierung) zunehmend. Im Lauf des 21. Jahrhunderts könnten die »Regenwälder der Meere« so größtenteils verschwinden.

Doch mancherorts gibt es Hoffnung, etwa im Roten Meer. Zwischen Arabischer Halbinsel und Nordostafrika existiert eines der weltweit größten Riffsysteme mit einer hohen Artenvielfalt. In den vergangenen Jahrzehnten kam es im zentralen und südlichen Roten Meer wiederholt zu Massenbleichen mit einer hohen Korallensterberate, und



die Kalkskelette wachsen stellenweise deutlich langsamer als zuvor. Dagegen scheinen die nördlichen Korallenbestände den Klimawandel bislang weitgehend zu ignorieren: Als beispielsweise vor Al Lith an der Südküste Saudi-Arabiens fast alle Hartkorallen im Zuge des letzten El Niños ihre symbiontischen Partner abstießen, standen jene nahe der ägyptischen Touristenstädte Hurghada und Sharm El-Sheikh unbeeindruckt in voller Pracht.

Es überrascht einigermaßen, dass großflächige Korallenbleichen diese Region bisher verschont haben. Schließlich gehört das Rote Meer nicht nur zu den wärmsten Gewässern der Erde, es heizt sich obendrein stärker auf als andere Ozeanregionen – vor allem entlang der beliebten Urlaubsorte an der ägyptischen Ostküste sowie in den nördlichen Ausläufern, dem Golf von Akaba und dem Golf von Sues. Die Wassertemperaturen steigen hier pro Dekade um 0,4 bis 0,45 Grad Celsius und damit dreimal schneller als im globalen Durchschnitt. Gerade im Sommer, wenn das Risiko einer Korallenbleiche am größten ist, liegt die Höchsttemperatur in weiten Teilen des nördlichen Roten Meers immer öfter mindestens ein Grad Celsius über dem historischen Mittel. Zudem dauern solche für die Korallen-Algen-Symbiose kritischen Phasen immer länger an. Warum hält die Partnerschaft trotzdem, und wann wird es auch hier zu heiß werden? Diesen Fragen sind zwei voneinander unabhängige Studien kürzlich nachgegangen. Antwort: Offenbar besitzen die Korallen im nördlichen Roten Meer evolutionsbedingt eine physiologische Reserve.

### **Selbst als die Temperatur um sechs Grad ansteigt, geraten die Korallen nicht ins Schwitzen**

Forscher um den Meeresbiologen Eslam Osman von der Al-Azhar University in Kairo sammelten verschiedene Arten, wie Knopf-, Blumenkohl- und Buschkorallen, jeweils im nördlichen und zentralen Roten Meer und setzten diese extremem Hitzestress aus. Nach zehn Tagen bei drei Grad Celsius über dem üblichen Sommermaximum hatte sich der Zustand der südlicheren Vertreter gegenüber einer Kontrollgruppe signifikant verschlechtert. Die Fotosynthese der symbiontischen Algen war teilweise dramatisch eingebrochen, wie es bei einer einsetzenden Korallenbleiche typisch ist. Jene aus dem Norden hingegen behielten ihre Aktivität unverändert bei – selbst dann noch, als die Wissenschaftler die simulierte Erwärmung verdoppelten. Auch ein Forscherteam um den Biogeochemiker Thomas Krüger von der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne konnte in Langzeitversuchen eine ausgeprägte Hitzetoleranz der Hartkorallen im Norden beobachten. Kalzifizierende Griffelkorallen aus dem Golf von Akaba zeigten trotz mehrwöchiger Hälterung bei erhöhten Temperaturen und verringertem pH-Wert (höherer Säureanteil) keine Anzeichen einer Bleiche. Im Gegenteil, die Erwärmung wirkte sich sogar positiv auf die Fitness der Korallen aus: Sie waren stärker pigmentiert, und ihre Symbionten produzierten mehr Sauerstoff.

Die Autoren der Studien liefern zwei mögliche Erklärungen für die regional offensichtlich sehr ungleich ausge-



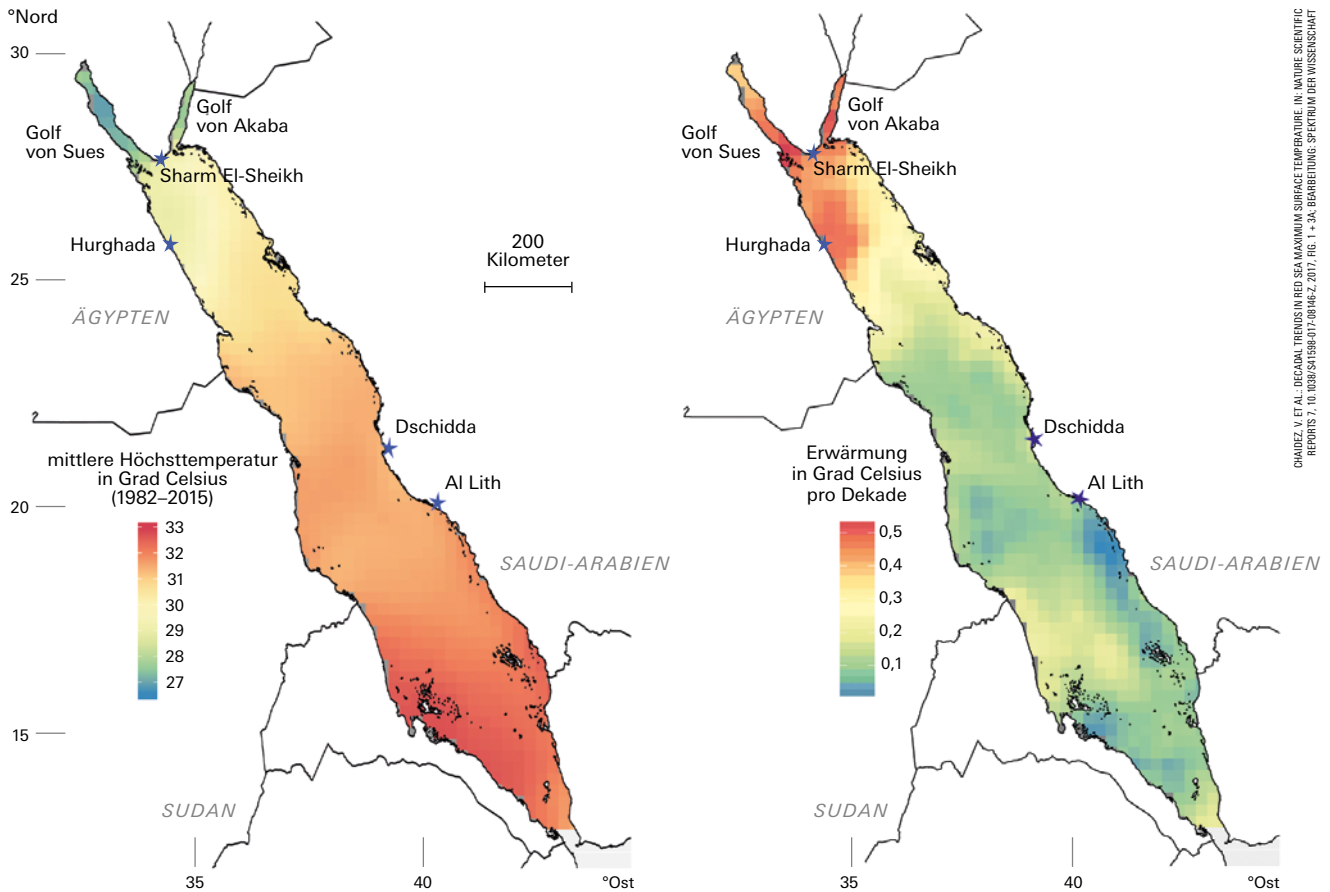
TIM KALVELAGE

**Ägyptische Rotmeerküste 2017: Im Jahr nach dem starken El Niño zeigt das Riff keine Anzeichen einer Korallenbleiche.**

prägte Widerstandsfähigkeit gegenüber steigenden Temperaturen. Zum einen könnten die Zirkulationsmuster der Wassermassen für eine geringere Hitzeexposition der nördlichen Riffe sorgen und verhindern, dass sich hier hochreaktive Sauerstoffradikale ansammeln und die Zellen der Korallen angreifen. Das würde zwar zur geografischen Verteilung historischer Bleichereignisse passen, jedoch nicht die unterschiedliche Hitzeanfälligkeit in den Laborexperimenten begründen. Wahrscheinlicher ist nach Ansicht der Wissenschaftler daher eine physiologische Reserve der nördlichen Korallen auf Grund thermischer Selektion bei der Besiedelung des Roten Meers: Alle Korallenpolypen, die seit Ende der letzten Eiszeit in die Region einwanderten, mussten die Warmwasserbarriere im Süden überwinden. Folglich hätten die Riffe im gesamten Roten Meer dieselbe Hitzetoleranz. Bei bis zu 33 Grad Celsius im Sommer führten die südlichen Korallen heute vielfach ein Leben am Limit, wohingegen jene im einige Grad kühleren Norden noch Spielraum hätten. Entsprechend optimistisch blicken die Forscher in die Zukunft: Selbst bei einer Erwärmung von drei Grad Celsius bis Ende des 21. Jahrhunderts könnte das nördliche Rote Meer von Massenbleichen verschont bleiben und Hartkorallen einen Zufluchtsort bieten.

Ein weiteres Refugium für Korallen in einem sich aufheizenden Ozean könnten die Gewässer um die Bermuda-Inseln sein. Bisher sind größere Bleichen auch hier ausgeblieben. Auf Grund ihrer nördlichen Lage (32. Breitengrad) sind die westatlantischen Riffe im Lauf des Jahres Tempe-

## Warm, wärmer, Rotes Meer



CHABEZ, V. ET AL.: DECADEAL TRENDS IN RED SEA MAXIMUM SURFACE TEMPERATURE. IN: NATURE SCIENTIFIC REPOSITS 7, 10.1038/S41598-017-0846-2, 2017, FIG. 1 + 3A. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

**Das Rote Meer gehört zu den heißesten Regionen im Ozean – im südlichen Teil erreicht die Wassertemperatur an der Oberfläche bis zu 33 Grad Celsius. Der Norden ist zwar kühler, erwärmt sich im Zuge des Klimawandels aber deutlich schneller als der Süden und andere Riffregionen der Tropen.**

raturen zwischen 18 und 31 Grad Celsius ausgesetzt. Inwiefern diese starken Schwankungen die Resistenz der Korallen gegenüber Umweltveränderungen beeinflussen, hat ein internationales Team von Meeresforschern um Travis Courtney von der Scripps Institution of Oceanography in San Diego untersucht. Zwei Jahre lang bestimmten sie vor der Küste Bermudas die Kalzifizierung von Poren- und Hirnkorallen. Überraschenderweise war diese am höchsten, wenn das Meer am wärmsten und der pH-Wert am niedrigsten war. Anschließend Modellberechnungen ergaben, dass die Temperatur maßgeblich ist für das Korallenwachstum und die Kalkbildung bei Erwärmung bis zu einem bestimmten pH-Schwellenwert zunehmen kann – vorausgesetzt die Korallen sind robust und gut genährt. Eine entscheidende Rolle spielt offenbar die kalte Jahreszeit: So hemmt nicht etwa der sommerliche Hitzestress die Riffbildung, sondern die Korallen können ihr Wachstumspotenzial bei niedrigen Temperaturen im Winter nicht ausschöpfen. Gleichzeitig bietet der Winter den Hartkorallen um Bermuda aber die Gelegenheit, sich nach besonders

warmen Sommern zu regenerieren. Sollte der globale CO<sub>2</sub>-Ausstoß ab 2020 sinken und sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre bis 2100 auf heutigem Niveau stabilisieren, so die Wissenschaftler, könnten die Korallen gravierenden Bleichen wohl langfristig aus dem Weg gehen; bei weniger günstigen Emissionsszenarien hätten allerdings selbst die Bermuda-Riffe geringe Chancen, dauerhaft zu überleben. ◀

**Tim Kalvelage** ist promovierter Meereswissenschaftler und Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

### QUELLEN

- Courtney, T.A et al.:** Environmental Controls on Modern Scleractinian Coral and Reef-Scale Calcification. In: Science Advances 3, e1701356, 2017
- Krueger, T. et al.:** Common Reef-Building Coral in the Northern Red Sea Resistant to Elevated Temperature and Acidification. In: Royal Society Open Science 4, 170038, 2017
- Osman, E.O. et al.:** Thermal Refugia against Coral Bleaching throughout the Northern Red Sea. In: Global Change Biology 10.1111/gcb.13895, 2017





# SPRINGERS EINWÜRFE KÜNSTLICHE GEHIRNE

**Angenommen, wir könnten ein menschliches Gehirn komplett in einem Supercomputer simulieren: Besitzt der dann Bewusstsein?**

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

» [spektrum.de/artikel/1527647](http://spektrum.de/artikel/1527647)

In den 1940er Jahren fragte sich der österreichische Philosoph Ludwig Wittgenstein, was es bedeutet, einem anderen Menschen Bewusstsein zuzubilligen – oder abzuerkennen: »Sag dir etwa: ›Die Kinder dort sind bloße Automaten; alle ihre Lebendigkeit ist bloß automatisch.‹ Und diese Worte werden dir entweder gänzlich nichtssagend werden; oder du wirst in dir etwa eine Art unheimliches Gefühl, oder dergleichen, erzeugen« (*Philosophische Untersuchungen* 420).

Umgekehrt können wir heute fragen: Wäre ein Automat, dessen Schaltkreise das Neuronengeflecht des menschliche Gehirns eins zu eins kopieren, bloß ein Zombie? Mit welchem Recht dürften wir ihm Bewusstsein absprechen, wenn wir es unseren ebenso komplexen Mitmenschen ohne Weiteres zugestehen?

## Netzwerke bewerten sich selbst

Vor dem »unheimlichen Gefühl«, das solche Fragen in uns erzeugen, bewahrt uns vorderhand die simple Tatsache, dass die Komplexität unseres Gehirns bei Weitem alles übersteigt, was ein noch so ausgefuchster Supercomputer derzeit zu leisten vermag. Dennoch haben sich rund zehn Großprojekte in aller Welt bereits auf den Weg zur Hirnsimulation gemacht, insbesondere das europäische Human Brain Project (HBP). Bekanntlich ist das milliardenschwere HBP nicht unumstritten. Viele Forscher kritisieren den Ansatz als allzu reduktionistisch: Es reiche nicht aus, riesige Datenmengen über Anatomie und Physiologie des Gehirns zu sammeln – und zu erwarten, man könne mit der »rohen Gewalt« (brute force) der Datenschwemme ein funktionierendes Hirnmodell zu Wege bringen.

Ganz in diesem Sinn meint der französische Neurowissenschaftler Yves Frégnac, bei solchen Big-Data-Projekten werde das Pferd von hinten aufgezäumt. Man investiere auf gut Glück Unsummen in eine »industrialisierte« Forschung, deren Methodik auf einer

primitiven Vorstellung vom Gehirn beruhe, und hoffe, der gewaltige Einsatz werde sich irgendwann auszahlen. Es sei jedoch naiv, anzunehmen, man könne nach dem Bottom-up-Prinzip ausgehend von einzelnen Nervenzellen zu einem Gesamtbild des lebenden Gehirns in Aktion gelangen. Auf Grund eigener Erfahrungen mit der Simulation des Sehsystems einfacher Organismen warnt Frégnac davor, die Komplexität des Wahrnehmungsapparats zu unterschätzen, ganz zu schweigen von höheren Hirnfunktionen wie Denken und Bewusstsein (*Science* 358, S. 470–477, 2017).

Deswegen müssen die Höchstleistungen des Gehirns aber nicht zwangsläufig auf ewig ein Buch mit sieben Siegeln bleiben, wie manche Philosophen postulieren. Der französische Kognitionsforscher Stanislas Dehaene schließt nicht aus, dass genügend komplexe Maschinen so etwas wie Bewusstsein entwickeln – sofern erst einmal geklärt wird, was damit gemeint ist (*Science* 358, S. 486–492, 2017).

Dehaene unterscheidet zwei Ebenen von Bewusstsein, wobei er sich spürbar bemüht, eine Sprache zu gebrauchen, die offenlässt, ob von Gehirnen oder Computern die Rede ist. Die erste Ebene verarbeitet »mentale« Repräsentationen von Objekten, während eine zweite Bewusstseins Ebene diese Verarbeitung selbstbezüglich beobachtet und kontrolliert. Die Niveaus interagieren als weitgehend unabhängige Module, was sich laut Dehaene an spezifischen Symptomen bei Hirnerkrankungen nachweisen lässt.

Können Maschinen auf beiden Ebenen arbeiten und damit quasi selbstbewusst agieren? Dehaene hält das für möglich: Schon heute konkurrieren Netzwerke beim so genannten »adversarial learning« miteinander und bewerten, wie gut sie Objekte und den eigenen Zustand wiedergeben. Zugleich ist seine Analyse Wasser auf Frégnacs Mühle: Alle Großprojekte zur Simulation des Gehirns lassen die Differenzierung zwischen höchst unterschiedlichen kognitiven Funktionen vermissen.

# PALÄOANTHROPOLOGIE PER DNA-VERLUST ZUM MENSCHEN?

**Das große Gehirn, der aufrechte Gang und unser Paarungsverhalten: Dies alles hätten wir vermutlich nicht ohne die Einbuße einiger DNA-Abschnitte, die für andere Primaten wichtig sind.**



**Philip L. Reno** hat am Philadelphia College of Osteopathic Medicine (Pennsylvania) eine außerordentliche Professur für biomedizinische Wissenschaften.

► [spektrum.de/artikel/1523493](http://spektrum.de/artikel/1523493)

► Wer im Zoo schon einmal Menschenaffen begegnet ist, dürfte die Faszination gespürt haben, die sie auf uns ausüben. Schon ihre langen Hände mit den geschickten Fingern wirken frappierend menschenähnlich, erst recht die ausdrucksstarken Gesichter, doch am meisten berührt der kluge Blick. Trotzdem heben wir uns von Schimpansen, Bonobos, Gorillas und Orang-Utans in einer Reihe entscheidender Merkmale ab, etwa dem aufrechten Gang und dem wesentlich größeren Gehirn, das uns überragende Intelligenz verleiht.

Anthropologen und Evolutionsbiologen fragen sich seit Langem, welche Evolutionsereignisse den Menschen einzigartig gemacht haben und wie es überhaupt zu ihnen kam. Bei solchen Studien verwenden sie heute unter anderem das Rüstzeug der modernen Genetik. Ein Ergebnis, das sich nun abzeichnet, dürfte viele überraschen: Einige der markantesten menschlichen Merkmale beruhen anscheinend nicht auf einem Zugewinn an Genen, sondern auf dem Verlust zentraler DNA-Abschnitte.

Verschiedene Forschungslabors, darunter meines, haben zurückverfolgt, wie einige dieser Einbußen genau abliefen. Dazu verglichen wir das Genom des modernen Menschen mit dem Erbgut anderer Säugetiere, aber auch mit dem vom Neandertaler und seinem Vetter, dem Denisova-Menschen vom Altai-Gebirge. Wir erkannten: Seit sich unsere Abstammungslinie vor rund acht Millionen Jahren vom Schimpansenast abspaltete, sind in der DNA unserer Vorfahren bestimmte Kontrollelemente verschwunden: genetische Schalter, die bei den anderen Arten während der Entwicklung der Individuen einige Schlüsselgene

aktivieren. Die gleichen DNA-Schaltelemente fehlten ebenso den Neandertalern, weshalb sie in einer frühen Phase der Menschenevolution verloren gegangen sein müssen, folglich bevor sich die beiden Menschenlinien trennten.

Bei genauerem Hinsehen zeigte sich, dass einige wesentliche menschliche Eigenschaften offenbar tatsächlich mit dem Verlust jener DNA-Sequenzen zusammenhängen, und zwar nach den bisherigen Befunden das große Gehirn, der aufrechte Gang und unsere Paarungsgewohnheiten. Erkenntnisse zu letzteren ergaben sich nicht zuletzt aus unerwarteten Befunden zu den Penissen von Primaten.

## **Aus der Stichlingsforschung kam die Idee, nach DNA-Schwund beim Menschen zu suchen**

Mein Interesse an der menschlichen Evolution erweckte, als ich an der Kent State University (Ohio) bei dem Paläoanthropologen C. Owen Lovejoy über geschlechtsspezifische Skelettunterschiede ausgestorbener Menschenvorfahren promovierte. Schon damals überlegte ich, was sich während dieser Evolution in den Genen und Entwicklungsprozessen verändert haben mochte. Als Postdoc bei David Kingsley an der Stanford University (Kalifornien) konnte ich solchen Fragen nachgehen.

Dessen Arbeitsgruppe erforscht unter anderem genetische Mutationen bei der Evolution von Stichlingen. Zu ihren Entdeckungen an diesen Fischen zählt: Der Verlust der stacheligen Beckenflossen bei Süßwasserformen geht auf das Fehlen eines bestimmten DNA-Abschnitts zurück. Dieser enthält einen Schalter, der zur Aktivierung eines Gens beiträgt, das bei der Ausbildung der stacheligen





Beckenflossen mitwirkt. Die Annahme erschien plausibel, dass sich auch in der menschlichen Evolution mitunter Genaktivierungen verändert haben, die sich anatomisch auswirken. Schon geringfügige Unterschiede von Aktivierungsmustern für Entwicklungsgene könnten mitunter große Folgen gehabt haben.

Waren womöglich in der Menschheitsgeschichte einige bislang wichtige DNA-Schalter verloren gegangen? Und falls ja, würden wir entsprechende Fälle finden? Immerhin standen uns für die Fragestellung bereits vollständig sequenzierte Genome vom Menschen und von Menschenaffen zur Verfügung. Zudem gab es computergestützte Verfahren, um derart umfangreiche Daten zu analysieren. Für diese Studie schlossen sich mehrere von uns aus Kingsleys Labor mit zwei Forschern der Stanford University zusammen, dem Informatiker Gill Bejerano und dem damaligen Doktoranden Cory McLean.

Wie lässt sich in einem so riesigen Genom wie dem menschlichen ein fehlender Schalter entdecken? Unsere DNA besteht aus 3,2 Milliarden »Buchstaben« oder Basen. 100 Millionen davon unterscheiden sich zwischen Mensch und Schimpanse. Wir wussten immerhin, dass sich DNA-Abschnitte für besonders wichtige Aufgaben in der Evolution kaum je verändern – dass ihre Sequenz konserviert ist, wie Biologen sagen. Konservierte Sequenzen ähneln einander bei zwei Arten umso stärker, je enger beide miteinander verwandt sind. Die DNA-Abschnitte, die für Proteine kodieren (die Proteingene), sind bei Mensch und Schimpanse zu 99 Prozent identisch. Allerdings machen Proteingene weniger als ein Prozent unseres Genoms aus. Selbst der große Rest stimmt jedoch immer noch zu 96 Prozent mit Schimpansen überein – und der interessierte uns.

Es ist noch nicht lange her, da tat man das meiste von diesem Rest als DNA-Schrott oder Junk-DNA (von englisch junk, Müll) ab, also als weitgehend nutzlos. Heute wissen wir, dass die scheinbar überflüssigen Teile des Erbguts voller unverzichtbarer Schalter stecken, welche Gene an- und ausknipsen können. Denn beinahe alle menschlichen Zellen enthalten zwar die gleichen gut

20000 Gene, aber diese sind keineswegs alle stets und überall aktiv, also angeschaltet. Beim Aufbau eines Gehirns müssen andere Gene mitwirken als etwa für Knochengewebe oder Haare. Weil sich nun Schimpansen und Menschen körperlich in vielem so sehr ähneln, verwundert es nicht, dass sich die riesigen DNA-Strecken voller Schaltelemente ebenfalls nicht besonders stark voneinander unterscheiden.

Doch gerade auf die wenigen dort vorhandenen Unterschiede kam es uns an. Für Außenstehende klingt es einfach: Wir suchten bei Affen und anderen Säugetieren nach DNA-Sequenzen, die bei ihnen allen fast nicht verändert sind und denen daher anscheinend eine grundlegende wichtige Funktion zukommt; nur beim Menschen sollten genau diese Abschnitte fehlen, also verloren gegangen sein. In einem ersten Schritt nahmen sich unsere Computerexperten das Erbgut des Schimpansen, einer Makakenart und der Labormaus vor. Als sie die Bereiche ohne proteinkodierende Gene verglichen, entdeckten sie tatsächlich Hunderte von DNA-Stücken, die bei den drei Arten kaum voneinander abweichen. Als zweiter Schritt erfolgte nun ein Abgleich dieser auffällig ähnlichen Sequenzen mit dem menschlichen Genom. Würden einige davon beim Menschen gar nicht auftauchen? Wir wurden fündig – besser gesagt eben nicht fündig: Mehr als 500 jener markanten Abschnitte fehlen im menschlichen Genom. Irgendwann nach der Abspaltung von der Schimpansenlinie müssen sie verschwunden sein.

### **Die zum Glück vergebliche Suche nach spezifischen potenziellen Genschaltern in der Junk-DNA**

Welche dieser vielen fehlenden Sequenzen sollten wir nun genauer betrachten? Wir waren speziell an genetischen Schaltern interessiert, die auf die Entwicklung des Organismus Einfluss nehmen. Deswegen konzentrierten wir uns auf fehlende Abschnitte – durch Mutation verursachte »Deletionen« – in der Nähe von Genen, die bekanntermaßen bei Entwicklungsprozessen eine Rolle spielen. Einer meiner Kollegen befasste sich mit einer Deletion nahe bei einem Gen, das die Bildung von Neuronen steuert. Ein anderer Mitarbeiter erforschte eine Sequenz im Umfeld eines Erbfaktors, der bei der Ausbildung des Skeletts mitwirkt.

Ich selbst untersuchte, passend zu meinen Studien über den geschlechtsspezifischen Körperbau, eine Deletion in der Nähe des Gens für den Androgenrezeptor. Diesen Rezeptor benötigen Zellen, um auf männliche Hormone wie Testosteron anzusprechen. Nur damit können sich männliche Merkmale ausbilden.

Zuerst mussten wir allerdings klären, ob diese beim Menschen fehlenden DNA-Abschnitte überhaupt einen aktivierenden Genschalter enthalten hatten. Dazu gewannen wir die betreffenden Sequenzen des Schimpansen sowie der Maus und verbanden diese DNA mit einem Gen, das Zellen blau werden lässt, wenn es aktiviert wird. Die zusammengebaute DNA injizierten wir in befruchtete Mauseizellen. Dann warteten wir gespannt, ob die Embryonen irgendwo blau werden würden – als Zeichen dafür, dass die betreffende DNA tatsächlich einen Gen-

## **AUF EINEN BLICK WENIGER IST MEHR**

- 1** Forscher haben mehr als 500 DNA-Abschnitte gefunden, die bei Schimpansen und anderen Säugetieren sehr ähnlich sind. Das spricht für ihre Bedeutung. Im menschlichen Genom fehlen sie jedoch.
- 2** Zumindest drei davon enthalten offenbar wichtige Genschalter. Deren Verschwinden beim Menschen könnte das Hirnwachstum, den Paarzusammenhalt und den aufrechten Gang begünstigt haben.
- 3** Vielleicht rühren somit entscheidende Impulse der Menschwerdung und neue Anpassungen auch von solchen Verlusten von DNA-Sequenzen her.

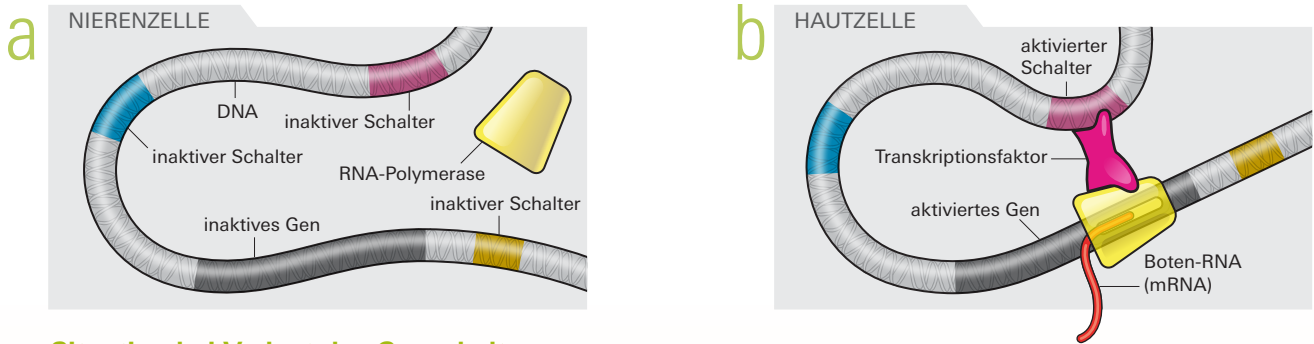


# Als Genschalter verloren gingen

Gene arbeiten je nach Bedarf. Ihre Aktivitätsmuster machen Wachstumsprozesse und Organfunktionen erst möglich. Enhancer – »Verstärker« oder »Einschalter« – genannte DNA-Sequenzen tragen dazu bei, Genaktivierungen zu regulieren. Mehrere solche Elemente können ein Gen in unterschiedlicher Weise beeinflussen.

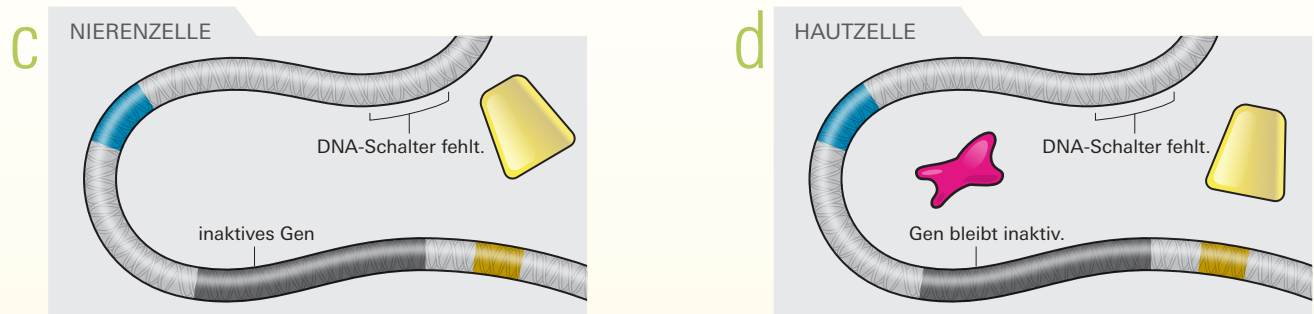
## Wie DNA-Schalter (Enhancer) wirken

Im Beispiel können drei verschiedene Enhancer die Aktivität eines Gens steuern. In der Nierenzelle (a) arbeitet keiner davon. Nur die Hautzelle (b) bildet einen Transkriptionsfaktor, der einen der Enhancer aktiviert, woraufhin eine RNA-Polymerase das Gen abliest.



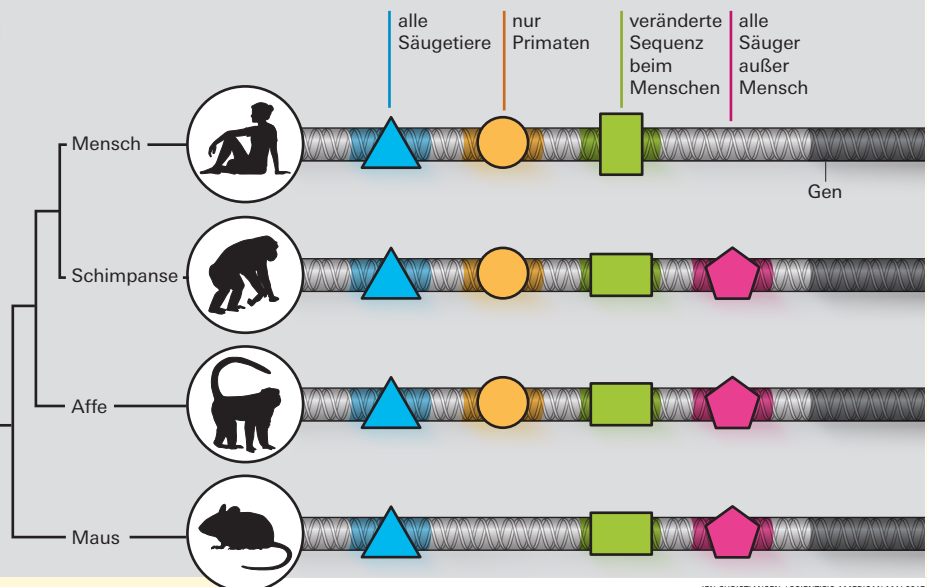
## Situation bei Verlust des Genschalters

Fehlt der im Beispiel oben aktivierte Enhancer, ändert sich für die Nierenzelle nichts (c). Die Hautzelle aber kann das Gen nun nicht mehr ablesen (d) – trotz des vorhandenen Transkriptionsfaktors. (Andere Zelltypen können das Gen über die anderen Schalter aktivieren.)



## Genschalter in der Evolution

Die nicht für Proteine kodierenden DNA-Abschnitte (hellgrau) enthalten zahlreiche Sequenzen (farbig) zum An- oder Abschalten von Genen (dunkelgrau). Manche davon sind so wichtig, dass alle Säugetiere, auch die Affen und der Mensch, dieselben aufweisen (blau). Andere Schalter treten nur bei den Primaten einschließlich dem Menschen auf (orange). Ein paar sind bei den Säugetieren gleich, haben sich aber beim Menschen verändert (grün), was vielleicht für seine Evolution bedeutsam war. Und auf andere Schalter konnte der Mensch offenbar sogar verzichten (rosa). Dieses Verschwinden könnte seine Evolution massiv vorangetrieben haben.



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2017

schalter aufweist, der sie zur passenden Zeit an bestimmten Orten aktiviert.

Das Ergebnis dieser Untersuchungen war eindeutig: Demnach sitzt in dem von mir untersuchten, beim Menschen fehlenden DNA-Abschnitt wirklich ein Anschalter für das Gen des Androgenrezeptors. Bei den Mausembryonen färbte sich der Genitalhöcker blau, aus dem je nach hormoneller Stimulation eine Klitoris oder ein Penis entsteht. Ebenso wurden die sich entwickelnden Brustdrüsen blau sowie im Gesicht die Stellen, wo Tasthaare (Vibrissen) zu wachsen pflegen. In all diesen jetzt angefärbten Geweben tritt der Androgenrezeptor auf, wodurch sie auf Testosteron ansprechen können. An den sich bildenden Genitalien erkannte ich bei genauerem Hinsehen, dass die Blaufärbung an jenen Stellen stattfand, wo am Penis der Nager später kleine harte Proteinstacheln sitzen.

In Gegensatz zu anderen Primaten, auch den Schimpansen, sind dem Menschen weder Sinneshaare im Gesicht noch Penisstacheln zu eigen. Viele andere Säugetiere besitzen diese beiden Merkmale ebenso. Bei männlichen Nagern führt Testosteronmangel zu kürzeren Vibrissen. Und sie bilden dann, genauso wie Affen unter solchen Umständen, keine Penisstacheln aus. Vorstellbar wäre daher durchaus, dass die beiden Merkmale nicht mehr auftauchen, wenn die betreffenden Gewebe gar keinen Androgenrezeptor herstellen – weil nämlich ein entscheidender DNA-Schalter fehlt, der dessen Gen aktiviert.

Die Kollegen erzielten ebenfalls aufregende Ergebnisse. Alex Pollen, damals noch Doktorand, machte eine hochinteressante Beobachtung hinsichtlich der menschlichen

tatsächlich zu der dramatischen Volumenzunahme beigetragen haben könnte. Denn dadurch wären wesentlich mehr Nervenzellen am Leben geblieben.

Ein ähnliches Phänomen fand Vahan B. Indjeian, der als Postdoc zu unserem Team gehörte, beim Skelett. In dem DNA-Abschnitt, den er untersuchte, sitzt ein Schalter nahe bei einem Gen, das beim Skelettwachstum eine Rolle spielt. Spezifisch wirkt sich die Aktivität dieses Gens auf die hinteren Extremitäten, insbesondere auf das Zehenwachstum aus. Der zweite bis fünfte Zeh sind beim Menschen im Vergleich zum Schimpansen kürzer – eine Anpassung an den aufrechten Gang. Womöglich trug der fehlende Gen-schalter dazu bei, weil sein Ausfall das Zehenwachstum eindämmte.

### **Rätself um die fehlenden Penisstacheln ... und eine plausible Lösung im Sozialverhalten**

Es ist nicht so schwer, sich vorzustellen, wie die postulierten Umstellungen im Gehirn- und Knochenwachstum ihren Teil zur Menschenevolution beitrugen. Schließlich sind das große Gehirn und der aufrechte Gang wesentliche Merkmale des Menschen. Auch die Einbuße der Vibrissen erscheint noch einigermaßen plausibel, denn unsere Ahnen wühlten und schnüffelten nicht mehr im Dunkeln mit der Schnauze nach Futter oder Beute. Stattdessen sammelten und fingen sie Nahrung mit den Händen, und das bevorzugt am Tag. Völlig einsichtig ist es allerdings nicht, wieso sie ohne die Sinneshaare besser dran gewesen sein sollen als vorher.

Doch vor allem die Sache mit den Penisstacheln mag zunächst wenig einleuchten. Welchen Vorteil soll ihr Verlust haben? Bei näherer Betrachtung passt aber gerade diese Tatsache zur Menschwerdung. Unseres Erachtens fügt sich der Verzicht auf Penisstacheln gut in eine Abfolge von neuen Anpassungen während der Menschenevolution, die weit reichende Auswirkungen darauf hatten, wie wir miteinander umgehen. Das berührt nicht zuletzt die körperliche Erscheinung von Mann und Frau und die typisch menschliche Weise, sich zu paaren und zusammenzuleben. Es betrifft zudem die Art, wie wir für unsere Kinder sorgen, und ebenfalls den Charakter der weiteren menschlichen Sozialbeziehungen.

Nicht nur die Primaten, auch viele andere Säugetiere bilden Penisstacheln aus, darunter Nagetiere, Katzen, Fledermäuse und Opossums. Die Auswüchse bestehen wie Fingernägel aus Keratin und können ganz verschieden aussehen und groß sein. Ihr Spektrum reicht von mikroskopisch kleinen, einfachen Kegeln bis zu längeren Borsten oder mehrspitzigen Gebilden. Je nach Tierart erfüllen sie diverse Funktionen: Sie können eine stärkere sexuelle Stimulation bewirken, den Eisprung in Gang setzen, Spermien eines Vorgängers entfernen oder die Vaginalschleimhaut so intensiv reizen, dass das Weibchen das Interesse an einer Paarung mit anderen Männchen verliert.

Bei Primaten mit stachelbewehrtem Penis sind die Kopulationen bemerkenswert kurz. Schimpansen benötigen dafür meist keine zehn Sekunden. Wie eine ältere Studie an Affen zeigte, dauern Paarungen fast doppelt so lang, wenn die Penisstacheln entfernt wurden. Daher ist zu



FOTOLIA / HLPHOTO

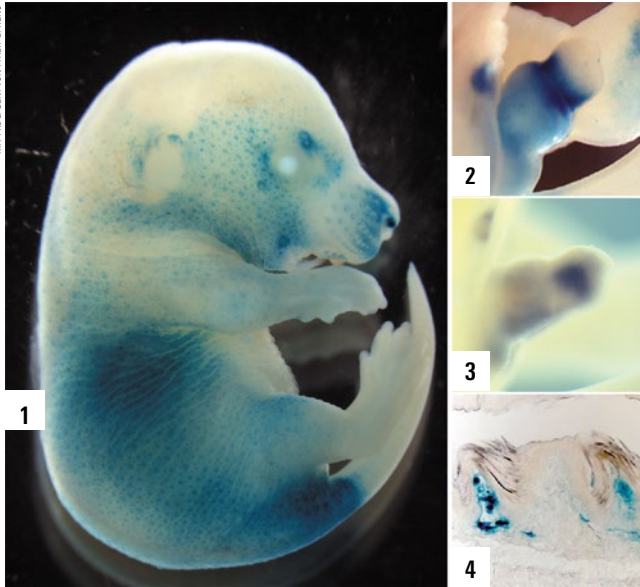
## **Mehr Wissen auf Spektrum.de**

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

Hirnvergrößerung, als er sich näher mit der Deletion bei einem Erbfaktor für die Regulation der Neuronenbildung beschäftigte. Er beobachtete, dass der beim Menschen fehlende DNA-Abschnitt jenes Gen im heranwachsenden Gehirn von Affen aktiviert. Das macht er allerdings nur an jeweils ganz bestimmten Orten des unfertigen Organs. Im Verlauf der Hirnentwicklung und -reifung bilden sich nämlich zunächst mehr Nervenzellen, als später vonnöten sind. Die überschüssigen Neurone werden dann wieder vernichtet. An diesem entscheidenden letzten Vorgang ist das Gen beteiligt.

Nun könnte man spekulieren: Hatte der Verlust dieses genetischen Schalters womöglich Anteil an unserer rasanten Hirnevolution? Mit rund 1400 Kubikzentimetern ist das menschliche Gehirn so viel größer als das eines Schimpansen mit nur 400 Kubikzentimetern, dass der Ausfall einer »Bremse« für übermäßigen Neuronenzuwachs





Wo ein in den Mäuseembryo injizierter Genschalter wirkt – also ein bestimmtes Gen aktiviert – ist hier an der Blaufärbung zu erkennen. Dieser Embryo hat blaue Pünktchen an Stellen, wo später Schnauzenhaare und andere Haare wachsen (❶) und wo sich die äußeren Genitalien und die Milchdrüsen ausbilden (❷). Wie ein anderes Verfahren zeigt, sitzt der betreffende Schalter dicht bei dem Gen, dessen Protein für die Testosteronempfindlichkeit wichtig ist (❸). Bei Mäuseböcken ist er zudem in Zellen, die Penisstacheln bilden, hochaktiv (❹).

vermuten, dass der glatte Penis unserer Vorfahren dazu beitrug, den Paarungsakt zu verlängern und ihn somit inniger zu machen.

Auch diese Anpassung hat eine evolutionäre Seite. Denn die menschliche Fortpflanzungsstrategie unterscheidet sich grundlegend von der aller Menschenaffen. Bei denen konkurrieren die Männchen, die wie alle Affen mit scharfen großen Eckzähnen bewehrt sind, heftig um paarungsbereite Weibchen. Schimpansen- und Bonobomännchen versuchen, möglichst mit jedem empfänglichen Weibchen im Umfeld zu kopulieren. Und wer zum Zuge kommt, setzt alles daran, Geschlechtsgenossen fernzuhalten. Beide Arten produzieren üppige Spermamengen: Ihre Hoden sind dreimal so groß wie die des Menschen. Aber die Aufzucht der Nachkommen überlässt ein Schimpansenmann völlig den Weibchen. Diese kümmern sich lange und intensiv um ihre Kinder und pflanzen sich erst nach deren Entwöhnung nach mehreren Jahren wieder fort.

Ganz anders verhält sich der Mensch. Hier leben Mann und Frau in einer recht verlässlichen Paarbindung, und der Vater hilft oft bei der Kinderaufzucht mit. Daher kann der Nachwuchs früher entwöhnt werden, was auch einen kürzeren Geburtenabstand ermöglicht. Der Wettstreit zwischen den Männern um Geschlechtspartnerinnen ist längst nicht so ausgeprägt wie bei den Menschenaffen. Wir glauben, dass der Verlust der Penisstacheln mit dem Verschwinden weiterer für Konkurrenzsituationen wichti-

ger Merkmale einherging, wie etwa der gefährlichen Eckzähne. Umgekehrt dürften Eigenschaften hinzugekommen sein, die eine Bindung und Kooperation förderten.

Den aufrechten Gang hält Lovejoy für ein wichtiges solches Merkmal. Er stellt sich vor, dass bei unseren frühen Vorfahren die Männer anfänglich zur Versorgung von Partnerin und Kind beitrugen, indem sie fett- und proteinreiche Nahrung heranschafften, beispielsweise Maden, Insekten und kleine Wirbeltiere. Um dergleichen in genügender Menge zu finden, mussten sie größere Strecken zurücklegen und das Essen dann nach Hause transportieren – mit den Händen. Laut Lovejoy könnte diese Anforderung ein erster An Schub für die Selektion des aufrechten Gangs gewesen sein.

Die Kooperation der Eltern bei der Versorgung der Kinder brachte weitere Vorteile mit sich. Sie konnten ihnen nun länger beistehen, also ihre Jugendjahre über die Phase des Stillens hinaus ausdehnen. Damit blieb dem Nachwuchs mehr Zeit zum Lernen, und das wiederum mag die Entwicklung eines großen und agilen Gehirns begünstigt oder sogar erst in Gang gesetzt haben. So gesehen hätten die drei hier beschriebenen DNA-Verluste in der Menschenevolution eng zusammengewirkt.

Als ich damals als Postdoc in Kingsleys Institut kam, ahnte ich nicht, dass ich einmal verstaubte Arbeiten aus den 1940er Jahren über Säugetiergenitalien studieren würde. Schon gar nicht konnte ich die Tragweite des Themas abschätzen. In meinem Labor erforschen wir weiterhin bedeutsame genetische Veränderungen und Entwicklungen während der Menschenevolution, die auf die Struktur der Genitalien und anderer Merkmale Einfluss nahmen. Im Fokus steht nun auch das Handgelenk. Wir möchten wissen, welche Randbedingungen zusammenkommen mussten, damit die vielen feinen Knochen der Hand schließlich zu einem derart perfekten Instrument zur Werkzeugherstellung werden konnten.

Vermutlich werden sich viele Fragen zu unserer Evolutionsgeschichte nie lösen lassen. Doch selbst wenn im Dunkeln bleibt, warum manche der Neuerungen auftraten: Die Molekularbiologie vermag zumindest aufzuzeigen, wie der evolutionäre Wandel ablief. ◀

#### QUELLEN

**Indjeian, V.B. et al.:** Evolving New Skeletal Traits by *cis*-Regulatory Changes in Bone Morphogenetic Proteins. In: *Cell* 164, S. 45–56, 2016

**Lovejoy, C.O.:** Reexamining Human Origins in Light of *Ardipithecus ramidus*. In: *Science* 326, S. 74–74e8, 2009

**McLean, C.Y., et al.:** Human-Specific Loss of Regulatory DNA and the Evolution of Human-Specific Traits. In: *Nature* 471, S. 216–219, 2011

**Reno, P.L.:** Genetic and Developmental Basis for Parallel Evolution and its Significance for Hominoid Evolution. In: *Evolutionary Anthropology* 23, S. 188–200, 2014

#### LITERATURTIPP

**Die Ursprünge der Menschheit.** Im Labyrinth unserer Evolution. Spektrum der Wissenschaft, Spezial Biologie, Medizin, Hirnforschung 4/2015

*Neue Erkenntnisse und Modelle zur menschlichen Evolution*

# GENETIK GEFÜRCHTETE NERVENKRANKHEIT

Einer der berühmtesten Patienten ist Stephen Hawking: Bei der bislang unheilbaren amyotrophen Lateralsklerose sterben motorische Nervenzellen unwiderruflich ab. Neue Techniken enthüllen nun die genetischen Ursachen der neurodegenerativen Erkrankung – und liefern viel versprechende Therapieansätze.



**Leonard Petrucelli** (links) leitet die Abteilung für Neurowissenschaften an der Mayo-Klinik in Jacksonville, Florida. **Aaron D. Gitler** ist außerordentlicher Professor am Lehrstuhl für Genetik der Stanford University School of Medicine, Kalifornien.

» [spektrum.de/artikel/1527651](https://spektrum.de/artikel/1527651)

▶ Amyotrophe Lateralsklerose (ALS) ist ebenso heimtückisch wie unheilbar. Die Krankheit lässt Nervenzellen verkümmern, die für Muskelbewegungen verantwortlich sind, und führt meist binnen weniger Jahre zum Tod. Anfangs verläuft sie schmerzfrei, mit zunächst subtilen Symptomen wie Stolpern, zunehmender Ungeschicklichkeit und undeutlicher Aussprache. Oft messen die Betroffenen dem keine große Bedeutung bei. Doch unaufhalt-

sam schreitet der Muskelabbau fort, und hinzu kommen Spastik, Krämpfe und Lähmungen.

Lange Zeit war die Krankheit in der Öffentlichkeit kaum bekannt. Erst Schicksale wie die von Lou Gehrig lenkten den Blick darauf. Der Baseballspieler, einer der erfolgreichsten der Geschichte, begann eines Tages, Bälle zu verlieren und aus unerfindlichen Gründen auf dem Spielfeld zusammenzubrechen. Der als »Stahlross« bezeichnete Sportler, der in 14 Jahren nicht weniger als 2130 Spiele bewältigt hatte, erhielt im Juni 1939 die Diagnose ALS. Nur einen Monat später bereitete ihm die Sportwelt einen tränenreichen Abschied im New Yorker Yankee Stadium. Seine motorischen Fähigkeiten verfielen dermaßen schnell, dass er bereits im Dezember zu schwach war, um seiner Aufnahme in die Ruhmeshalle der größten US-Baseballspieler (Baseball Hall of Fame) beizuwohnen. Die Krankheit, die nach ihm »Lou-Gehrig-Syndrom« benannt wurde, fesselte ihn ans Bett, und im Juni 1941 starb er im Alter von 37 Jahren.

Heute leiden 3 bis 8 von 100 000 Einwohnern an ALS; jährlich erkranken etwa 2 von 100 000 neu daran. Diese Häufigkeit gilt weltweit vergleichbar und bedeutet in den USA bis zu 25 000, in Deutschland bis zu 6500 Betroffene. Das Leiden tritt meist zwischen dem 50. und 70. Lebensjahr auf, kann sich aber auch schon zwischen 20 und 30 manifestieren. Es macht sich bemerkbar, wenn bestimmte Nervenzellen im Gehirn und Rückenmark, so genannte Motoneuronen, abzusterben beginnen. Weil sie dafür verantwortlich sind, Nervensignale zu den Muskeln weiter-

## AUF EINEN BLICK VERHÄNGNISVOLLES NERVENLEIDEN

- 1** Die amyotrophe Lateralsklerose (ALS) gehört zu den häufigsten neurodegenerativen Erkrankungen. Sie greift Nervenzellen an, die Signale vom Gehirn und Rückenmark zu den Muskeln übertragen.
- 2** Mit fortgeschrittenen Techniken enthüllen Wissenschaftler nach und nach die genetischen Ursachen des Leidens. Demnach können Veränderungen in diversen Erbanlagen das Erkrankungsrisiko erhöhen.
- 3** Diese Erkenntnisse münden bereits in neue Behandlungsmethoden, etwa das Stilllegen von Genen. Auch nach besseren Diagnoseverfahren suchen die Forscher.





1963 erhielt Stephen Hawking die Diagnose ALS. Mediziner glaubten damals, er habe nur noch wenige Jahre zu leben.

GETTY IMAGES / DAVE J. HOGAN

zuleiten, führt ihr Verlust zu einer verminderten Beweglichkeit und Geschicklichkeit ebenso wie zu einem eingeschränkten Sprechvermögen und Schluckstörungen. Die höheren Hirnfunktionen bleiben dagegen meist ungetastet – ALS-Patienten müssen daher ihren fortschreitenden körperlichen Verfall bei vollem Bewusstsein miterleben. Sie sind schon bald auf den Rollstuhl angewiesen und später bettlägerig. Am Ende können sie nicht einmal mehr eigenständig atmen, geschweige denn kommunizieren oder essen. Die meisten sterben binnen 3 bis 5 Jahren an Lungenversagen. Der einzige Arzneistoff, den die US-Arzneimittelbehörde FDA zur Behandlung von ALS zugelassen hat, ist der Natriumkanal-Blocker Riluzol. Er verlängert die Überlebenszeit der Patienten im Mittel um drei Monate. Eine Heilung gibt es nicht.

#### **Rätselhaftes Krankheitsbild trotz klar beschreibender Bezeichnung**

Der französische Neurologe Jean-Martin Charcot, der die Krankheit 1869 erstmals beschrieb, ließ die beobachtbaren Symptome in ihre Bezeichnung eingehen. »Amyotroph« bedeutet mangelnde Nährstoffversorgung der Muskeln; »lateral« (seitlich) bezieht sich auf den Bereich des Rückenmarks, in dem große Teile der sterbenden Motoneuronen zu finden sind; und unter »Sklerose« versteht man die Verhärtung oder Vernarbung des Gewebes, die mit dem Verkümmern der Motoneuronen einhergeht. Trotz Charcots klarer Beschreibung ist ALS ein dermaßen komplexes Krankheitsbild, dass es heute, fast anderthalb Jahrhunderte später,

den Forschern immer noch Rätsel aufgibt. Obwohl das Leiden ausnahmslos tödlich verläuft, überleben aus unbekanntem Gründen etwa 10 Prozent der Patienten mehr als 10 Jahre – und einige sogar noch deutlich länger. Zu dieser Minderheit gehört der berühmte Physiker Stephen Hawking, der jetzt seit mehr als fünf Jahrzehnten mit ALS lebt.

Soweit wir wissen, haben Umweltfaktoren kaum einen Anteil daran, ob die Krankheit ausbricht oder nicht. Wenn sie überhaupt eine Rolle spielen, dann wahrscheinlich, indem sie genetisch bereits vorbelastete Personen empfänglicher für die Krankheit machen. Besonders rätselhaft ist, dass ALS weitgehend zufällig aufzutreten scheint. Bei weniger als 10 Prozent der Fälle lässt sich ein Zusammenhang zu genetischen Merkmalen zeigen, die vererbt werden und somit familiär gehäuft auftreten. Die übrigen Fälle werden als nicht ererbt oder »sporadisch« eingestuft.

Trotzdem: Dank ausgeklügelter Sequenzieretechniken wissen wir heute sehr viel genauer als noch vor zehn Jahren, welche biologischen Mechanismen dem Leiden zu Grunde liegen. Immer deutlicher zeichnet sich ab, dass die Wahrscheinlichkeit, zu erkranken, von vielen verschiedenen Erbanlagen abhängt – wobei diese sowohl einzeln als auch zusammen wirken können. Bestimmte Mutationen lassen sich mit nahezu 70 Prozent der familiären Fälle in Verbindung bringen und mit immerhin etwa 10 Prozent der sporadischen. Die riesige Fülle neuer genetischer Daten lässt auf innovative, bessere Therapieansätze hoffen. So haben Mediziner festgestellt, dass sie manche ALS-Varianten behandeln können, indem sie spezifische Gene stille-

gen – eine Methode namens Gene Silencing. Klinische Studien hierzu sind bereits auf dem Weg. Zudem suchen Wissenschaftler nach Biomarkern, die zeitigere Diagnosen und eine bessere Kontrolle des Krankheitsverlaufs erlauben. Das können Substanzen in Körperflüssigkeiten sein oder auch Muster der elektrischen Aktivität im Gehirn. Solche Biomarker könnten darüber hinaus helfen, neue medikamentöse Therapien zu entwickeln.

Menschen mit familiär gehäufter ALS (fALS) geben die Krankheit meist mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit an die nächste Generation weiter. Obwohl sie nur einen kleinen Anteil der Patienten stellen, haben sie in außergewöhnlichem Maß dazu beigetragen, die genetischen Mechanismen der Krankheit aufzuklären. Auf vererbare Ursachen wiesen erstmals Studien im Jahr 1993 hin, bei denen sich herausstellte, dass etwa 20 Prozent der fALS-Patienten eine Mutation im Gen *SOD1* tragen. Diese Erb-anlage enthält den Bauplan für das antioxidative Enzym Superoxid-Dismutase (SOD), das aggressive Superoxid-Moleküle in weniger schädliche Formen überführt.

### **Untergang der Motoneuronen wegen einer überlasteten zellulären Müllabfuhr?**

Anfangs vermuteten Wissenschaftler, die Mutation in *SOD1* schwäche die antioxidative Wirkung des Enzyms und erlaube es reaktionsfreudigen Sauerstoffverbindungen somit, die Motoneuronen verheerend zu schädigen. Heute wissen wir ziemlich sicher, dass dies nicht zutrifft. Viele mutierte SOD-Varianten haben nichts von ihrer enzymatischen Aktivität eingebüßt – und selbst wenn, scheint das keinen Einfluss darauf zu haben, wann die Krankheit ausbricht oder wie schnell sie fortschreitet.

Vielmehr scheint das defekte Enzym stärker zum Verklumpen zu neigen. Bei den meisten Autopsien verstorbener ALS-Patienten trat ein typisches Muster im Gehirn zu Tage: irreguläre Eiweißaggregate, die sich in den Motoneuronen angesammelt hatten. Offensichtlich hatte in diesen Zellen das Recyclingsystem versagt, das normalerweise die Bausteine ausrangierter Proteine wieder aufbereitet. Alle Proteine und Enzyme müssen eine bestimmte dreidimensionale Gestalt annehmen, um ihre jeweilige Funktion korrekt auszuüben. Mutationen in ihrem Bauplan können dazu führen, dass sie sich nicht in die richtige Form falten und infolgedessen verklumpen. Die Zelle markiert diese fehlerhaften Proteine mit dem Molekül Ubiquitin, um sie ihrem Entsorgungs- und Recyclingsystem zuzuführen. Ist die zelluläre Müllabfuhr allerdings überlastet, sammelt sich der Abfall an. Bei Patienten mit bestimmten fALS-Varianten sind die Motoneuronen regelrecht vollgestopft mit Aggregaten aus abnormen, Ubiquitin-markierten Superoxid-Dismutase-Molekülen.

Ein großer Durchbruch in der ALS-Forschung gelang 2006, als Wissenschaftler sich mit Patienten befassten, bei denen das Gen *SOD1* nicht mutiert ist. Wie sich herausstellte, ist bei diesen Betroffenen fast immer ein anderes Protein namens »TAR DNA-Binding Protein 43« (kurz TDP-43) in den Motoneuronen verklumpt. TDP-43 gehört zu einer Klasse von Eiweißen, die die Aktivität von messenger-RNAs (mRNAs) regulieren – kurzen Abschriften der DNA,

die als Bauanleitung für die Proteinbiosynthese dienen. TDP-43 bindet an mRNAs, steuert ihre Weiterverarbeitung im Zellkern, transportiert sie an die jeweiligen Zielorte in der Zelle und übt noch andere wichtige Funktionen aus, die für das Übersetzen von RNA in Proteine erforderlich sind. Bei ALS-Patienten gelangen TDP-43-Moleküle aus dem Zellkern heraus und beginnen sich im Zytoplasma anzuhäufen. Offen ist die Frage, ob das einen Funktionsverlust des Proteins zur Folge hat (da es nun im Zellkern fehlt) oder im Gegenteil dessen Wirkung enorm steigert (weil es sich im Zytoplasma anhäuft) oder beides zugleich.

Genetiker haben auch schon die Erbanlage gefunden, die für TDP-43 kodiert: Es handelt sich um das Gen *TARDBP*. Wie sich herausstellte, ist es bei Angehörigen von Familien, in denen ALS vererbt wird, manchmal auf ungewöhnliche Weise mutiert. Veränderungen in einem RNA-bindenden Protein können also ALS verursachen – eine wichtige Erkenntnis. In der Tat haben Forscher seither noch viele weitere ALS-relevante Gene identifiziert, die für Proteine kodieren, welche an der RNA-Regulation beteiligt sind. In den späten 2000er Jahren gab es geradezu atemberaubende Erkenntnisfortschritte, als Wissenschaftler jedes Jahr ein bis zwei neue ALS-relevante Gene fanden. Aber die spannendste Entdeckung sollte erst noch kommen.

2011 berichteten zwei Forscherteams unabhängig voneinander, sie hätten bei Patienten mit einer bestimmten fALS-Variante eine sonderbare Mutation gefunden – und zwar in einem Genabschnitt namens *C9ORF72*. Die Bezeichnung steht für einen bestimmten Teil eines Gens, nämlich dessen 72. »Open Reading Frame« (ORF), der die Bauanleitung für ein Protein enthält. Das entsprechende Gen liegt auf Chromosom 9. Bei gesunden Menschen findet sich darin die kurze Nukleotidsequenz GGGGCC in 2- bis 23-facher Wiederholung. Bei Personen mit der *C9ORF72*-Mutation jedoch liegt sie hunderte bis tausende Male wiederholt vor (siehe Infografik gegenüber).

Wie nachfolgende Untersuchungen gezeigt haben, könnte diese extreme genetische Redundanz fast für die Hälfte (40 bis 50 Prozent) aller fALS-Erkrankungen verantwortlich sein – und für 5 bis 10 Prozent der sporadischen Fälle. Mehr noch: Sie stellt auch eine Verbindung her zwischen ALS und einer weiteren neurodegenerativen Erkrankung, der frontotemporalen Demenz (FTD), die mit Persönlichkeitsveränderungen und beeinträchtigter Entscheidungsfindung einhergeht. *C9ORF72*-Mutationen können entweder ALS oder FTD verursachen oder auch eine kombinierte Erkrankung aus beiden mit der Bezeichnung ALS-FTD. Bei Menschen, die solche Mutationen tragen, häufen sich TDP-43-Proteine in den Nervenzellen pathologisch an – und zwar sowohl bei ALS als auch bei FTD. Dies lässt vermuten, dass beide Störungen zu einem Spektrum verwandter Erkrankungen gehören, wobei noch unklar ist, wie Veränderungen in ein und demselben Gen zu so unterschiedlichen Symptomen führen können.

Auf welche Weise *C9ORF72*-Mutationen wirken, ist nahezu unbekannt. Momentan diskutieren Wissenschaftler drei Möglichkeiten: Erstens könnten die vielen Wiederholungen der Nukleotidsequenz GGGGCC die Proteinsynthese stören – und somit die Menge und Wirkung des entspre-



# Enthüllung eines Gendefekts

ALS-Erkrankungen können diverse genetische Ursachen haben. Ein sehr hoher Anteil der Fälle lässt sich darauf zurückführen, dass die Nukleotidsequenz GGGGCC auf dem Chromosom 9 abnorm gehäuft auftritt: Normalerweise liegt sie 2- bis 23-fach, bei ALS-Patienten jedoch hunderte bis tausende Male vor. Noch ist nicht vollständig geklärt, wie das zum Krankheitsausbruch führt. Arzneimittelentwickler testen aber bereits ein synthetisches Molekül, ein so genanntes Antisense-Oligonukleotid (ASO), um diese Genmutation stummzuschalten.

## Drei mögliche Mechanismen

Die Mutation tritt in der Erbanlage *C9ORF72* auf, dem 72. »Open Reading Frame« eines Gens auf Chromosom 9. Es gibt drei verschiedene Möglichkeiten, wie die RNA, die beim Abschreiben (»Transkribieren«) dieser DNA-Region entsteht, Motoneurone schädigen könnte.

Mutation (abnorm viele Wiederholungen der Sequenz GGGGCC)

*C9ORF72*-Gene

DNA

RNA

Ribosom

hergestelltes Protein



**SZENARIO 1:** Die Sequenzwiederholungen sorgen dafür, dass die Zelle weniger RNA-Abschriften dieser DNA-Region herstellt und somit zu wenig von dem Protein entsteht, das dort kodiert ist.

fehlgefaltete RNA-Moleküle

**SZENARIO 2:** Die Zelle schreibt die überschüssigen Sequenzwiederholungen in entsprechend repetitive RNA um, die sich in fehlerhafter Weise faltet und mit zahlreichen weiteren RNA- und Proteinmolekülen verklumpt.

**SZENARIO 3:** Der zelluläre Syntheseapparat übersetzt die abnorme Sequenzhäufung in nutzlose und toxische Proteine, die ihrerseits verklumpen und so die betroffenen Neurone schädigen.

Injektion der ASO-Moleküle in die Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit.

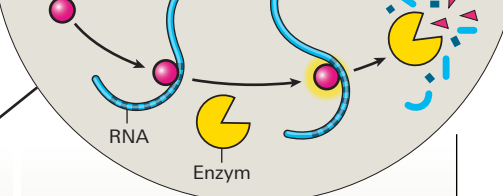
## Therapeutische Gegenmaßnahme

Forscher stellen künstliche ASO-Moleküle her, die innerhalb der Zelle an die RNA-Abschrift des mutierten *C9ORF72*-Genabschnitts binden und sie zum Abbau durch zelleigene Enzyme freigeben. Das schaltet die Mutation stumm. ASO-basierte Arzneistoffe sollen nun in klinischen Studien getestet werden. Dabei spritzen die Mediziner den Wirkstoff in die Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit von ALS-Patienten, welche die *C9ORF72*-Mutation tragen.

ASO-Molekül

RNA

Enzym



nutzlose Proteine

chenden Proteins in der Zelle herabsetzen. Allerdings weiß keiner, welche genaue Funktion das Eiweiß ausübt. Zweitens könnten die zahlreichen Sequenzwiederholungen dazu führen, dass die daraus hergestellte RNA in den Zellkernen verklumpt, dort RNA-bindende Proteine an sich bindet und diese daran hindert, ihrer eigentlichen Aufgabe nachzukommen. Drittens könnten die endlosen GGGGCC-Abschnitte von der Zellmaschinerie in abnorme Proteine übersetzt werden, die ihrerseits zum Verklumpen neigen.

Die bisherigen Daten lassen auf eine der letzten beiden Möglichkeiten schließen, vielleicht auch auf beide zugleich. Ob nun die RNA-Aggregate stärker zu den Krankheitssymptomen beitragen oder eher die Proteinklumpen, dürfte am Ende ohnehin irrelevant sein. Denn die Mediziner entwickeln Therapieansätze, die bei einer *C9ORF72*-Mutation beides unterbinden: sowohl das Umschreiben der Gensequenz in RNA als auch deren Übersetzung in ein Proteinmolekül.

Eine der meistversprechenden Vorgehensweisen bei neurodegenerativen Erkrankungen ist, Gene mit so genannten Antisense-Oligonukleotiden (ASO) stillzulegen. Ein ASO-Molekül ist eine kurze Kette aus Nukleotiden, den Bausteinen der Nukleinsäuren, und so konstruiert, dass es an eine mRNA-spezifische Sequenz bindet. Dies lässt ein Enzym in Aktion treten, welches das RNA-ASO-Konstrukt attackiert. Die Methode erlaubt es, beinahe jede beliebige mRNA auszuschalten und somit auch die jeweils dazu gehörende Erbanlage zu inaktivieren. Denn ohne mRNA, die »Abschrift« des Gens, wird das Gen nicht mehr in sein Produkt umgesetzt und bleibt stumm. Untersuchungen an Nagetieren haben belegt, dass sich der schädliche Effekt von *C9ORF72*-Mutationen verhindern lässt, indem man mit geeigneten ASO-Molekülen die entstehenden RNA-Aggregate in Motoneuronen auflöst – und somit auch unterbindet, dass Klumpen aus abnormen Proteinen entstehen.

Medikamente auf Basis von ASO-Molekülen, die mutierte *C9ORF72*-Genabschnitte stilllegen, sollen schon bald in klinischen Studien getestet werden. Ein anderer ASO-Arzneistoff, der mutierte *SOD1*-Gene stummschaltet und helfen soll, familiär gehäufte ALS-Formen zu behandeln, hat bereits erste klinische Tests hinter sich. Sie haben ergeben, dass sich der Wirkstoff ohne ernste Nebenwirkungen in die Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit einbringen lässt, von wo aus er die Motoneuronen erreicht.

Ein weiteres ASO, entwickelt zur Behandlung der spinalen Muskelatrophie (SMA), sorgt bei Wissenschaftlern für vorsichtigen Optimismus. Diese genetische, neurodegenerative Erkrankung des Kindesalters hat vieles mit ALS gemein. Nur sehr wenige Kinder, die davon betroffen sind, werden älter als drei Jahre. Kürzlich haben Mediziner in zwei klinischen Studien einen ASO-basierten Arzneistoff getestet, der bei SMA-Patienten verhindert, dass ein bestimmtes mutiertes Gen in abnorme mRNA umgeschrieben wird. Das führte bei den erkrankten Kindern zu einer derart drastischen Verbesserung der motorischen Fähigkeiten, dass die US-Arzneimittelbehörde FDA die Studien beschleunigte und dem Arzneistoff Ende 2016 die Zulassung erteilte.

Seltene fALS-Varianten zu untersuchen, hat sehr dazu beigetragen, die biologischen Mechanismen dieser Erkrankung zu verstehen. Die größte Herausforderung bleibt aber, bei Patienten mit sporadischen Formen genetische Mutationen zu finden, die Betroffene für die Krankheit anfällig machen. Weltweit sammeln Forscher DNA-Proben von ALS-Patienten und durchsuchen diese nach entsprechenden Veränderungen. Um dies zu beschleunigen, führen sie mit Mikrochips so genannte genomweite Assoziationsstudien durch – also Untersuchungen dazu, wie stark die getesteten Genome variieren. Auf diese Weise können sie das Erbgut von ALS-Patienten in kurzer Zeit mit dem von gesunden Menschen vergleichen. Genomweite Assoziationsstudien können zwar nicht die Ursache von ALS enthüllen, aber verdächtige Unterschiede zwischen der DNA von Gesunden und Kranken aufdecken, die dann eine nähere Überprüfung lohnen. Jüngst haben solche Untersuchungen an rund 10 000 ALS-Patienten und etwa 20 000 gesunden Personen zahlreiche Abweichungen zwischen beiden Gruppen offengelegt, die Mediziner nun näher erforschen.

Sobald die Wissenschaftler einen umfassenden Katalog jener genetischen Varianten erstellt haben, die mit ALS zusammenhängen, werden sie erkunden, wie die entsprechenden Mutationen das Krankheitsrisiko erhöhen. Dabei wird es darum gehen, wie Erbanlagen miteinander wechselwirken, ob einige ALS-Varianten vielleicht von mehreren mutierten Genen verursacht werden und wie Umweltfaktoren dazu beitragen, das Nervenleiden auszulösen. Neuen Studien zufolge könnte ALS zum Teil auf das Aufwachen schlafender Retroviren zurückgehen – viraler DNA-Sequenzen also, die sich schon vor langer Zeit ins Genom integriert haben, normalerweise aber inaktiv bleiben. Es könnte sein, dass aktivierte Retroviren in manchen ALS-Patienten von Neuron zu Neuron springen, die Zellen dabei schädigen und so die Krankheit herbeiführen.

Immer mehr Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass bei ALS nicht nur Motoneurone absterben. Auch

**Im Rahmen der »ALS Ice Bucket Challenge« (»Eiskübelherausforderung«) haben Millionen Menschen Videos ins Netz gestellt, in denen sie sich mit eiskaltem Wasser übergießen (lassen). Zu ihnen gehörte auch der australische Formel-1-Rennfahrer Daniel Ricciardo (Foto). Die Kampagne half, ALS ins öffentliche Bewusstsein zu rücken und viele Forschungsgelder einzuwerben.**



GETTY IMAGES / MARK THOMPSON

Gliazellen, die im Zentralnervensystem weit häufiger vorkommen als Neurone, könnten eine wichtige Rolle spielen. Sie üben zahlreiche Funktionen aus: Einige dienen den Nervenzellen als Stützgerüst oder elektrischer Isolator, andere regulieren das chemische Milieu im Gehirn, indem sie an Stofftransport und Flüssigkeitsaustausch mitwirken. Unlängst sorgten Untersuchungen an Mäusen, die Mutationen im *SOD1*-Gen trugen, für eine Überraschung. Das Stummschalten des mutierten Gens in Gliazellen verlängerte die Lebenszeit der Tiere – obwohl in deren Motoneuronen das krank machende (mutierte) Protein nach wie vor wirkte. Möglicherweise geht die Krankheit zwar von den Motoneuronen aus, schreitet aber unter Mitwirkung der Gliazellen schneller fort. Wüssten die Forscher, welche Faktoren dabei eine Rolle spielen, könnten sie diese gezielt blockieren und so den Krankheitsverlauf verlangsamen oder aufhalten.

Bei alledem bemühen sich die Wissenschaftler auch darum, neue Biomarker zu finden, die es den Ärzten erlauben, das Fortschreiten der Krankheit zu verfolgen. Sie versuchen zum Beispiel, jene abnormen Proteine nachzuweisen, die aus den oben beschriebenen *C9ORF72*-Mutationen resultieren. Am besten wäre es natürlich, wenn man diese Eiweiße in leicht zugänglichen Körperflüssigkeiten aufspüren könnte, etwa dem Blut oder der Rückenmarksflüssigkeit. Anfang 2017 berichtete einer von uns (Petrucci), er habe entsprechende Proteine in der Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit von ALS- und ALS-FTD-Patienten detektiert – und ebenso von Personen, die das mutierte Gen tragen, aber keine Krankheitssymptome ausprägen. Solche Messungen könnten zu einer besseren Frühdiagnose beitragen. Andere Forscher setzen auf weiterentwickelte bildgebende Verfahren, um die Klumpen aus TDP-43-Proteinen nachzuweisen, die in den Gehirnen von ALS-Patienten bereits im frühen Krankheitsstadium entstehen. All diese Biomarker könnten zudem helfen, den Erfolg verschiedener Therapieverfahren zu bewerten, die in klinischen Studien getestet werden.

Rasche Fortschritte in der Genetik sowie die Etablierung neuer Biomarker nähren die Hoffnung, dass wir bald in eine neue Ära der ALS-Behandlung eintreten. Schon in naher Zukunft dürften die Mediziner den Patienten spezielle Thera-



pie- oder Präventionsverfahren empfehlen können, die auf deren individuelle ALS-Varianten zugeschnitten sind.

Die jüngsten Erfolge in der ALS-Forschung verdanken wir der Bereitschaft zahlreicher Betroffener, an groß angelegten genetischen Studien teilzunehmen. Eine bedeutende Rolle haben aber auch die Social Media gespielt, über die ALS-Patienten und ihre Familien auf die Krankheit aufmerksam wurden, was einerseits ein öffentliches Bewusstsein dafür schuf und andererseits half, finanzielle Mittel für die Forschung und Patientenbetreuung einzuwerben. Das Paradebeispiel dafür ist die »ALS Ice Bucket Challenge« (»ALS-Eiskübelherausforderung«), die im Sommer 2014 das Internet eroberte. Der Baseballspieler Pete Frates, der mit 27 die Diagnose ALS erhalten hatte, wollte Geld für die Non-Profit-Hilfsorganisation »ALS Association« einwerben, die sich im Kampf gegen die Krankheit engagiert. Hierfür postete er ein Video auf Facebook, in dem er seine Freunde dazu aufforderte, sich einen Eimer eiskalten Wassers über den Kopf zu schütten. Die Kampagne verbreitete sich wie ein Lauffeuer. Innerhalb von nur acht Wochen stellten Facebooknutzer mehr als 17 Millionen Ice-Bucket-Challenge-Videos online, und es kamen mehr als 115 Millionen US-Dollar zusammen, von denen 67 Prozent in die Forschung flossen, 20 Prozent in die Patientenbetreuung und 9 Prozent an Bildungseinrichtungen.

ALS ist eine grausame Krankheit. Vor Gehrigs aufwühlender Abschiedsrede im Yankee-Stadium – in der er sich selbst als »glücklichsten Menschen auf der Erde« bezeich-

nete – und bevor die Öffentlichkeit von seiner Diagnose erfuhr, litten die meisten Betroffenen im Stillen. Doch heute entwickelt die Gesellschaft ein wachsendes Bewusstsein dafür, auch dank Menschen wie Pete Frates. Die Eiskübel-Kampagne hat bewirkt, dass die ALS Association ihr jährliches Forschungsbudget verdreifachen konnte. Wissenschaftler sind optimistisch, dass unser Wissen darüber, welche biologischen Prozesse ALS zu Grunde liegen, weiterhin rasant zunehmen wird. Die sich ständig ausweitende Rasterfahndung nach krankheitsverursachenden Genen wird mit Sicherheit zu besseren Therapien führen, um dieses fürchterliche Leiden in Schach zu halten. ◀

#### QUELLEN

**Renton, A. E., Chiò, A., Traynor, B. J.:** State of Play in Amyotrophic Lateral Sclerosis Genetics. In: Nature Neuroscience 17, S. 17–23, 2014

**Taylor, J. P., Brown, R. H. Jr., Cleveland, D. W.:** Decoding ALS: From Genes to Mechanism. In: Nature 539, S.197–206, 2016

**Yokoyama, J. S., Sirkis, D. W., Miller, B. L.:** C9ORF72 Hexanucleotide Repeats in Behavioral and Motor Neuron Disease: Clinical Heterogeneity and Pathological Diversity. In: American Journal of Neurodegenerative Disease 3, S. 1–18, 2014

#### WEBLINK

ScientificAmerican.com/jun2017/als-genes  
*ALS-Experte Leo McCluskey erklärt, wie der Physiker Stephen Hawking seit 50 Jahren mit der Krankheit lebt (englisch).*

# Unsere Neuerscheinungen!

Ausgewählte Sonderhefte auch im PDF-Format



Teure Tempel: Stürzte der Turm von Babel den Staat in den Ruin? • Kopf oder Herz: Philosophen und Poeten suchten den Sitz der Seele • Akustikwunder Forum: Wenn Cicero sprach, lauschten tausende Römer • € 8,90



Miniergehirne aus dem Labor • Neurobiologie: Nächtliche Gehirnwäsche • Plastizität Das Gehirn neu verdrahten • Neurowissenschaft: Warum träumen wir? • Hirnevolution: Wie man einen Faustkeil macht • Das GPS im Gehirn • € 8,90; ab 26.01. 2018



Ritzen: Jung, verletzt – und lebensmüde? • Familie: Eltern am Ende ihrer Kräfte • Magersucht: Das Hungern besiegen • Zwanghaftes Verhalten: Tyrann im Kopf • Schule: Zu früh zum Lernen • Wenn die Kleinen groß werden • € 8,90

## Hier bestellen:

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

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

# LANDWIRTSCHAFT WETTRÜSTEN MIT EINEM KÄFER

Ein gefräßiges Insekt bedroht die Maisernten der USA. Die Agrarindustrie hält mit Gentechnik und weiteren aufwändigen Mitteln dagegen – doch die Schädlinge passen sich an jede neue Strategie an.





Auf einem zehn Meter hohen Turm zwischen Maisfeldern sammelt ein Wissenschaftler mit einem Fangnetz Maiswurzelbohrer, um die Käfer (rechts) anschließend zu untersuchen.



PATRICK CAVANI / BROWN



**Hannah Nordhaus** arbeitet als Journalistin in Boulder, Colorado, und schreibt über Themen aus Wissenschaft, Geschichte und Natur.

» [spektrum.de/artikel/1527653](https://spektrum.de/artikel/1527653)

CASIE ZAUID

► Piper City hat trotz des Namens nichts mit einer Stadt gemein. Beim Dorf im ländlichen Illinois in den USA erinnert höchstens die Silhouette etlicher Getreidesilos entfernt an eine Skyline. Dahinter erstrecken sich bis zum Horizont Felder: Mais, Soja, Mais, Soja, Mais, Mais, Mais – keine Bäume, keine Kühe, keine Hecken, kein Fleck unberührter Erde. Hierhin reiste der Insektenforscher Joseph Spencer im August 2013, um die Ackerflächen des Farmers Scott Wyllie zu inspizieren.

In guten Jahren funktionieren der Anbau und die Ernte von Mais wie am Fließband, standardisiert und vorhersehbar. Dann stehen alle Pflanzen in akkuraten Abständen, sind gleich hoch und praktisch ununterscheidbar. Wyllies Mais jedoch wuchs kreuz und quer. Die Stängel waren krumm und ließen sich entweder leicht aus dem Boden ziehen oder knickten bereits von selbst um. Die normalerweise weißen Wurzeln waren braun und angefressen. Und in der Luft wimmelte es von länglichen, maiskorngroßen, schwarz-gelb gestreiften Käfern. Sie kletterten auf den Blättern herum, kopulierten, setzten Kot ab und knabberten an den Pflanzenfasern. Spencer musste den Mund fest geschlossen halten, damit die Insekten nicht hineinfliegen.

Bei den Tieren handelte es sich um Maiswurzelbohrer, deren wurmähnliche Larven ihr namensgebendes Zerstörungswerk verrichtet hatten. Dabei hatte Wyllie penibel befolgt, was Experten ihm im Kampf gegen den Schädling empfohlen hatten: Er hatte auf seinen 400 Hektar Acker-



PATRICK CAVAN BROWN

land Mais im jährlichen Wechsel mit Soja angebaut, um dem Maiswurzelbohrer periodisch die Nahrungsgrundlage zu entziehen, und er hatte genetisch modifizierten Mais gepflanzt, der die Larven töten sollte. Doch heute konnte Spencer vor Ort beobachten, dass beide Ansätze – die erfolgreichsten und am häufigsten angewendeten Strategien im Kampf gegen das Tier – versagten. »Mir lief ein Schauer über den Rücken«, erinnert sich Spencer. »Das war das Worst-Case-Szenario.« Spencer hatte das Verhalten des Maiswurzelbohrers jahrelang am Umweltforschungsinstitut Illinois Natural History Survey in Urbana-Champaign untersucht. Er wusste: Die um ihn herum-schwirrenden Insekten waren nicht nur ein Problem für den Bauern Wyllie, sondern für den gesamten so genannten Maisgürtel des Mittleren Westens – einige benachbarte Bundesstaaten, die den Großteil der Ernte der gesamten USA liefern.

Der Westliche Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera virgifera*) ist der verheerendste Schädling für die Landwirtschaft der Vereinigten Staaten. Wegen der massiven, immer wieder auftretenden Verluste nennt man ihn dort plakativ den Eine-Milliarde-Dollar-Käfer, obwohl sich die Einbußen und die Kosten für Gegenmaßnahmen inzwischen eher auf zwei Milliarden Dollar pro Jahr summieren. Sein gesamter Lebenszyklus hängt vom Mais ab, dem im Land am häufigsten angebauten Getreide. Die Pflanze wächst auf mehr als 30 Millionen Hektar, und die Ernten bringen jährlich über 50 Milliarden Dollar Umsatz. Allein um den Käfer zu bekämpfen, geben die Bauern jede Saison hunderte Millionen Dollar für Chemikalien, spezielles

## AUF EINEN BLICK AUF VERLORENEM POSTEN?

- 1 Der Maisanbau ist einer der wichtigsten Zweige der US-Landwirtschaft. Der Maiswurzelbohrer vernichtet immer wieder einen beträchtlichen Anteil der Pflanzen auf den Feldern.
- 2 Die Agrarindustrie entwickelte ständig neue Mittel gegen den Käfer und seine Larven, zunächst Pestizide, inzwischen vor allem gentechnisch verändertes Saatgut. Der Schädling wird aber meist schnell resistent.
- 3 Die in den USA üblichen Monokulturen erleichtern diese Anpassung. Obwohl die Tiere inzwischen auch in Europa anzutreffen sind, ist hier die Gefahr wegen kleinerer Äcker und vielfältigerer Fruchtfolgen geringer.





Insektenforscher Joseph Spencer beobachtet das Verhalten von Maiswurzelschädlern, die er und sein Team in Zelten gefangen haben (a). Die Larven der Käfer fressen an den Maiswurzeln und zerstören so die Pflanze (b).

Saatgut und Arbeitskräfte aus. Firmen investieren ähnlich viel, um neue Produkte dafür auf den Markt zu bringen.

Das Ergebnis ist ein wahrer Rüstungswettlauf. Der Käfer zerstört die Ernten. Die Agrarkonzerne erfinden etwas, um den Käfer zu töten. Dieser entwickelt eine Resistenz und sucht den Mais wieder heim. Daraufhin gibt es eine neue Waffe. Im vergangenen Jahrzehnt bestand die beste Strategie gegen den Maiswurzelschädler aus einem genetisch modifizierten Mais, der die Larven verenden lässt, indem er ein giftiges Protein produziert. Doch Spencer sah 2013 in Wyllies Feldern, dass selbst das die Käfer nicht mehr von ihrem Tun abhielt.

### Wie ein harmloses Insekt aus der Prärie zum Superschädling wurde

Heute setzen Landwirte und Industrie ihre Hoffnungen auf kommende Maissorten mit speziellen Molekülen, die in den Zellen der Käfer wichtige Gene ausschalten. Doch Wissenschaftler und Umweltschützer sorgen sich, dass die genetischen Veränderungen auch nützlichen Insekten wie den Marienkäfern schaden könnten. Spencer, dessen Forschung der Agrarriesse Monsanto finanziell unterstützt, hält die neue Entwicklung ohnehin nur für ein Spiel auf Zeit: »Wir können Resistenzen nicht verhindern, nur aufschieben.«

Als der Insektenforscher John Lawrence LeConte 1868 zum ersten Mal über den Käfer schrieb, handelte es sich noch um ein harmloses Insekt aus Zentralamerika, das in kleinen Populationen in den westlichen Great Plains vorkam. Die Käfer kletterten im Frühsommer aus der Erde, ernährten sich von Mais, Kürbispflanzen und Präriegrä-

sern, pflanzten sich fort, legten ihre Eier in Erdspalten ab und starben vor dem ersten Frost. Im Frühling schlüpfen kleine, weiße Larven, die in der Erde an den Wurzeln knabberten, bis aus ihnen eine neue Generation Käfer wurde.

Mit der Einführung von effizienten Bewässerungssystemen in den 1950er Jahren wurde die Massenproduktion von Mais möglich, und erst da breitete sich der Maiswurzelschädler von Colorado und Kansas über die ehemaligen, nun mit Mais bepflanzten Grassteppen nach Osten aus. 1964 trafen die Käfer in Illinois ein und waren zu dem Zeitpunkt schon gegen viele Insektizide resistent.

Da der Maiswurzelschädler sich fast nur von Mais ernährt und seine Eier vor Ort ablegt, konnten Bauern die Käfer in Schach halten, indem sie Mais und Soja abwechselnd anbauten. So schlüpfen die Larven im nächsten Jahr in einem Feld mit Soja, fanden nichts zu fressen und starben. 1987 allerdings bekam der Entomologe Eli Levine am Natural History Survey einen Anruf von einem Landwirt aus Piper City. Dieser hatte Schäden an seinem Mais entdeckt, der in Fruchtfolge mit Soja angebaut worden war. Levine fuhr nach Piper City, um eine Erklärung zu finden. Die Ursache war eine verhängnisvolle Verhaltensänderung: Offenbar legten einige Käferweibchen ihre Eier nicht mehr direkt im Maisfeld ab, sondern suchten eines mit Sojapflanzen auf. Auf diesem würde im Folgejahr Mais wachsen – ein gefundenes Fressen für die Larven. Die Käfer konnten sich also nicht nur an Pestizide anpassen, sondern auch an moderne Anbaumethoden. Die Farmer in Illinois und Indiana erlitten massive Ernteeinbußen.

1996 beauftragte der Illinois Natural History Survey schließlich Joseph Spencer, das Verhalten des Maiswurzelschädlers näher zu untersuchen. Der Entomologe hatte bis dahin an Zwiebelfliegen geforscht und bei Vorträgen über dieses Tier selten vor vielen Menschen gesprochen. Als er dagegen das erste Mal über den Maiswurzelschädler referierte, hörten ihm mehr als 1500 Landwirte und Wissenschaft-



ler zu. Dieses plötzliche Interesse begeisterte Spencer. Hier konnte er etwas bewegen.

Inzwischen hatten sich resistente Käfer von Illinois nach Iowa, Michigan, Missouri, Ohio, Ontario und Wisconsin ausgebreitet. Das Einkommen der Landwirte hing völlig von gesundem Mais ab. Sie besprühten ihre Felder mit hochkonzentrierten Breitspektrum-Insektiziden, eine Verzweiflungstat, die niemandem so recht gefiel.

Zu Beginn des Jahrtausends brachte Monsanto eine willkommene Alternative auf den Markt: genmodifizierten Mais. Die Variante konnte ein Eiweißmolekül des Bakteriums *Bacillus thuringiensis* (Bt) produzieren, das die Larven der Maiswurzelbohrer tötet. In den Jahren zuvor hatte sich die Strategie bei einer Maiszünsler genannten Motte bereits als wirkungsvoll erwiesen. Nun verwendete Monsanto Gene eines speziellen Bt-Stamms, dessen Gift sich als effektiv gegen den Maiswurzelbohrer herausgestellt hatte.

### Um den Käfer zu besiegen, müssen wir seine Anpassungsfähigkeit verstehen

Ungefähr fünf Jahre lang verbuchten Farmer mit diesem neuen Saatgut ähnliche Erfolge wie beim Maiszünsler. Doch 2009 entdeckten Landwirte in Iowa erneut Schäden, und bald wurde klar, dass einige Populationen des Maiswurzelbohrers eine Resistenz entwickelt hatten. Die Käfer in Wyllies Feld erwiesen sich als unempfindlich gegenüber dem Fruchtwechsel und mindestens zwei verschiedenen Bt-Toxinen. Im Sommer 2016 dokumentierten Wissenschaftler schließlich eine Resistenz gegenüber einem dritten Toxin; ein viertes im Mais wirkt zwar noch auf den Feldern, aber Laboruntersuchungen zufolge sind einige Populationen inzwischen auch diesem Gift gegenüber weniger empfindlich.

Angesichts der Resistenzen wird Spencers Arbeit zum Verhalten des Maiswurzelbohrers wieder bedeutsamer. Er möchte herausfinden, welche Käfer besonders lange Strecken zurücklegen und so potenziell gefährliche Eigenschaften weit verbreiten. Einige Maiswurzelbohrer können sogar mehr als 100 Kilometer überwinden, wenn sie in den Aufwind von Gewittern geraten. Spencer besitzt ältere Fotografien von zentimeterdicken Schichten angespülter Käfer am Ufer des Lake Michigan, in den sie ein Sturm getragen hatte.

An einem feuchtwarmen Nachmittag im Juli 2016 fuhr Spencer mit einigen Studenten zu einem Testgebiet in der Nähe eines Labors des Natural History Survey. Hier stehen vier gelbe, etwa zehn Meter aufragende Gerüste in den Feldern. Spencer bestieg eines davon, bewaffnet mit einem Insektennetz und einer Kühltasche mit Glasfläschchen und Trockeneis. Drei Studenten kletterten auf die anderen Plattformen, weitere blieben am Boden. Das Team wollte möglichst viele Maiswurzelbohrer sammeln und einige wichtige Fragen klären: Welche Populationen fliegen weg und welche bleiben da? Verlassen die Tiere, die resistent gegenüber Bt-Mais und der Fruchtfolge sind, eher ihre Heimatfelder?

Als Spencer zum ersten Mal in Illinois war, konnte er manchmal bis zu 15 Käfer pro Minute fangen. In den Jahren nach der Einführung des Bt-Mais wurden es deut-



lich weniger, und Überflutungen im Frühjahr 2015 hatten viele Larven ertränkt und so die Populationen zusätzlich reduziert. In der Nacht im Juli 2016 fing Spencer mit seinen Studenten lediglich neun Insekten. Am nächsten Tag untersuchte er ihren Darminhalt im Labor. Die Felder um die Gerüste waren mit zwei verschiedenen Maissorten bepflanzt, von denen jede ein anderes Bt-Toxin produziert. Die Wissenschaftler bestimmten, welche Eiweißstoffe sich in den Käfern befanden, und damit, wo sie gefressen hatten. Enthält ein Insekt eine Substanz, die am Fangort nicht vorkommt, ist es offenbar gewandert. Das Team hat auch Zelte über Maisfeldern aufgestellt und sammelt dort geschlüpfte Käfer mit umgebauten Staubsaugern ein. Wenn auf den Feldern Bt-Mais wächst, müssen die Tiere eine Resistenz entwickelt haben, sonst wären sie nicht dort.





Spencers Team zieht in einem Gewächshaus Maispflanzen, die Käfer tötende Gifte produzieren (a). Spencer untersucht Larven unter einem Mikroskop (b). Die Larven werden mit Wärmelampen von den Wurzeln vertrieben und eingesammelt (c). Im Labor züchten Forscher die Larven, bis sie nach fünf Monaten schlüpfen (d).



Die Agrarkonzerne rüsten unterdessen im Kampf gegen den Maiswurzelbohrer weiter auf. Unternehmen wie Monsanto, DuPont Pioneer, Syngenta und Dow AgroSciences, die gentechnisch verändertes Saatgut verkaufen, antworten auf die Entwicklung von Resistenzen, indem sie seit 2009 unterschiedliche Bt-Toxine kombinieren. Solch ein Mais kann die Resistenzbildung verzögern, denn die Maiswurzelbohrer werden sozusagen von mehreren Fronten angegriffen, wie Bakterien bei einem Cocktail aus verschiedenen Antibiotika. Nach dem katastrophalen Sommer 2013 hat auch Bauer Wyllie solches Bt-Saatgut angepflanzt und hält die Käfer damit unter Kontrolle – vorläufig. Denn nachdem inzwischen drei der vier eingebauten Gifte nicht mehr richtig funktionieren, sieht es für die nahe Zukunft nicht gut aus. »Wenn man ein kaum noch ef-

fektives Toxin mit einem anderen kombiniert, funktioniert das unter dem Strich kaum besser als ein einzelner Wirkstoff«, sagt Spencer. Ohne den wirksamen Schutz einer zweiten Substanz wird die erste viel anfälliger gegenüber neuen Resistenzen. Bauern benötigen also neue Zutaten für die Mixtur. Zwar werden immer wieder weitere potenziell hilfreiche Bakteriengene entdeckt, doch es kostet mehr als ein Jahrzehnt und über 100 Millionen Dollar, ein Produkt durch die Zulassungsverfahren zu bringen.

### Ist eine verheißungsvolle Gentechnik-Wunderwaffe wirklich ohne Nebenwirkungen?

Ein anderer Stoff könnte dem Cocktail schon früher beigegeben werden. Monsanto will die Marktzulassung eines Saatguts erreichen, das den Mechanismus der so genannten RNA-Interferenz (RNAi) ausnutzt. RNA ist das Molekül, das den genetischen Code übersetzt und die Anleitung zum Zusammenbau von Proteinen liefert. Die neue Technologie schaltet spezifische Gene aus oder regelt sie herunter. Wenn die Larven des Maiswurzelbohrers den Mais fressen, legen Segmente von doppelsträngiger RNA, die in einem Labor entwickelt und in die Pflanze eingebaut worden sind, bestimmte Insektengene still. Da diese Gene für Proteine kodieren, die essenziell für die Zellen sind, sterben die Tiere.

Monsanto hat von den Behörden der USA schon grünes Licht für Freilandexperimente erhalten. Falls die Zulassung für RNAi-Saatgut erfolgt – möglicherweise bereits gegen Ende des Jahrzehnts –, wäre das die erste Anwendung von RNA-Interferenz in der Landwirtschaft in großem Stil. Die Technologie ist viel versprechend. Während die Kollateralschäden durch traditionelle Pestizide bei anderen Insekten sowie Wassertieren, Vögeln und Säugetieren immens sind, sollte RNAi nur den Zielorganismus schädigen.

Doch das ist die Theorie. 2012 entdeckte ein chinesisches Forscherteam Pflanzen-RNA in der Leber von Mäusen, die anscheinend mit der Nahrung aufgenommen wurde. Bis dahin dachte man, der unwirtliche Magen-Darm-Trakt von Säugetieren würde RNA-Moleküle zerstören. Die Ergebnisse der chinesischen Wissenschaftler zeigten die Möglichkeit auf, Erbgut in Pflanzen könnte sich auch auf Menschen auswirken. Zudem berichteten Forscher 2013 auf einer Konferenz, die RNA gegen Maiswurzelbohrer wäre in der Lage, auch Marienkäfer zu töten. Im gleichen Jahr machte Jonathan Lundgren, ein US-Insektenexperte am North Central Agricultural Research Laboratory, seine Vermutung öffentlich, dass RNAi auf unerwartete Weise auch Nichtzielorganismen treffen kann. Heute wirft er seinem Arbeitgeber, dem Landwirtschaftsministerium der Vereinigten Staaten, vor, anschließend weitere Untersuchungen behindert zu haben, etwa die Veröffentlichung einer Arbeit zu möglichen Auswirkungen von RNAi auf das Genom von Honigbienen. »Ich bin nicht grundsätzlich gegen Produkte auf Basis von RNAi«, erklärt er. »Doch beim Mais wären auf einen Schlag riesige Gebiete davon betroffen.«

Vielen Wissenschaftlern reichen die bisherigen Hinweise auf die Sicherheit jedoch aus. Zum Beispiel konnten die Ergebnisse an den Mäusen nicht reproduziert werden. Was die Zulassung der RNAi-Maispflanze von Monsanto

angeht, sieht die US-Umweltschutzbehörde keine überzeugenden Beweise, doppelsträngige RNA werde vom Magen-Darm-Trakt von Menschen oder anderen Säugetieren aufgenommen und richte dort Schaden an. »Die Chancen dafür gehen gegen Null«, bekräftigt Craig Mello, Molekularbiologe an der University of Massachusetts Medical School. Er hat RNAi 1998 mitentdeckt und dafür 2006 den Nobelpreis erhalten. Maiswurzelbohrer haben zwar einige Gensequenzen mit anderen Insekten gemein, zum Beispiel diejenigen, die für das Sterben der Marienkäfer in der Studie von 2013 verantwortlich waren. Doch Monsanto betont, das Produkt zielt auf einen Teil des Erbguts ab, den man in Marienkäfern oder anderen nützlichen Insekten aus der Umgebung von Maisfeldern nicht finde.

Die einzelnen Anbauflächen in der Region sind meist mindestens mehrere hundert Hektar groß, und alle Bauern bearbeiten ihr Land selbst, teilweise mit der Unterstützung von Familienmitgliedern und Saisonarbeitern. Doch selbst auf diese Weise sind die Gewinne gering. Als der Preis für Mais 2012 bei über 300 Dollar pro Tonne lag, konnte ein Maisfarmer im nördlichen Illinois nach Abzug der Produktionskosten 700 Dollar pro Hektar einstreichen. Doch 2015 waren die Preise für Mais gefallen und die Bauern verloren Geld – mehr als 100 Dollar pro Hektar. »Da wird einem klar, warum die Bauern mit dem Maiswurzelbohrer kein zusätzliches Risiko eingehen wollen«, kommentiert Michael Gray, ein ehemaliger Kollege von Spencer.

Das gilt auch für andere Organismen. Bei einer Fahrt nach Piper City deutet Spencer auf ein Flugzeug über den Maisfeldern, das eine Mischung aus Fungiziden und

Insektiziden über die Felder versprüht. Der Forscher meint, in einem typischen Maisfeld in Illinois krabbele wahrscheinlich gar nichts mehr. »Für einen Insektenkundler ist es beunruhigend, durch ein Feld zu laufen und nicht ein einziges Tier zu finden«, sagt er. »Der Boden ist geradezu sterilisiert. Genau das wollen die Farmer.«

Die Landwirte brauchen Sicherheit, egal ob durch gentechnisch erzeugtes Saatgut oder mit Hilfe von Sprühflugzeugen. Doch diese Denkweise verschärft den Teufelskreis. Wo die Bauern einst abwechselnd Mais, Weizen, Alfalfa, Hirse und Hafer anpflanzten, wächst heute nur Mais und Soja, Mais und Soja. Diese einfache, planbare Struktur mögen jedoch nicht nur die Farmer, sondern ebenso die Maiswurzelbohrer. Eine 1000 Hektar große Monokultur ist für einen allein arbeitenden Bauern besser zu bewältigen; sie macht es Maiswurzelbohrern aber auch leichter, auf einen Schlag die gesamte Ernte zu vernichten.

In Europa sind die Voraussetzungen für den Käfer weniger paradiesisch. In den frühen 1990er Jahren ist er auch hier aufgetaucht. Wahrscheinlich gelangte er zuerst nach Serbien und hat sich von dort ausgebreitet. Die Landwirte fürchteten zunächst vergleichbare Schäden wie in den USA. Doch die Betriebe in Europa sind kleiner, es wird weniger Mais angebaut, und die Bauern setzen auf eine Fruchtfolge mit vielen verschiedenen Pflanzen. In Regionen, wo Mais in Monokulturen wächst, haben die Insekten teilweise erhebliche Schäden angerichtet, insgesamt jedoch sind die Populationen bislang unter Kontrolle. Der Agrarentomologe Stefan Vidal von der Universität Göttingen bilanziert: »Der Maiswurzelbohrer ist in Europa

## Der Schädling in Europa

Der Maiswurzelbohrer gelangte Anfang der 1990er Jahre vom amerikanischen Kontinent wohl zunächst nach Serbien, möglicherweise über Hilfslieferungen während der Jugoslawienkriege. Von dort aus hat er sich in Europa ausgebreitet und wurde bereits um die Jahrtausendwende unter anderem in Italien, der Schweiz, Tschechien und Österreich nachgewiesen. Große Schäden gab es 2009 in der norditalienischen Tiefebene: 30 Prozent der Ernte waren vernichtet. Seit 2007 ist der Maiswurzelbohrer auch in Deutschland zu finden, vor allem in Niederbayern und im Oberrheingraben Baden-Württembergs, aber auch in nördlicheren Landesteilen.

Anfangs war das Ziel der Europäischen Union noch die Ausrot-

tung des Eindringlings. Nachdem dieser Versuch in den meisten Regionen trotz strenger Vorschriften, hoher Kosten und großen Aufwandes gescheitert ist, konzentriert man sich seit 2014 mit verschiedenen Maßnahmen nurmehr darauf, die Befallszahlen möglichst gering zu halten.

Insektizide zur zielgerichteten chemischen Bekämpfung sind nicht überall zugelassen oder dürfen wegen möglicher Umweltschäden nicht mehr eingesetzt werden; 2008 verursachte ein Beizmittel für Maissamen ein Massensterben von Bienenvölkern in Baden-Württemberg. Biologische Strategien mit natürlichen Feinden wie Nematoden werden noch erprobt. Zum Teil sollen auch Sexualduftstoffe das Paarungsver-

halten der Käfer stören. Der für den US-Markt entwickelte gentechnisch veränderte Mais ist in Europa nicht erlaubt.

Eine bislang recht wirkungsvolle Strategie sind Fruchtwechsel: Mais darf nicht mehr jedes Jahr auf demselben Feld angebaut werden. Betriebe, die bislang nur Mais gepflanzt hatten, mussten ihren Maschinenpark für zusätzliche Pflanzen umrüsten. In Deutschland wird oft mit Weizen abgewechselt; in der Schweiz führen die Bauern häufig sogar eine viergliedrige Fruchtfolge durch, bei der es den Käfern anscheinend besonders schwer fällt, sich in einer Region zu etablieren. Mit Lockstofffallen werden die Populationsdichten überwacht, um rechtzeitige Gegenmaßnahmen zu ergreifen.





PATRICK CAVAN BROWN

Die winzigen, wurmförmigen Larven fressen an den Maiswurzeln, bis die Pflanzen absterben.

kein besonderes Problem.« Vidal hilft der Europäischen Union, die Anstrengungen beim Kampf gegen den Schädling zu koordinieren. Diversität, sagen die europäischen Landwirte, ist die beste Verteidigung (siehe »Der Schädling in Europa«, links).

Für die Bauern im Maisgürtel der Vereinigten Staaten ist dieser Zug längst abgefahren. Im Moment können sie auf dem hochspezialisierten Agrarmarkt mit seinen gigantischen Feldern nur durch Massenproduktion wirtschaftlich arbeiten. Riesige Mähdrescher mit Stückpreisen von einer halben Million Dollar, hangargroße Scheunen, Pestizide, Hightechsaatgut – aus der Aufrüstungsspirale scheint kein Weg mehr heraus zu führen.

Das Gehirn eines Maiswurzelbohrers ist klein, doch Evolution wirkt durch ihre eigene Intelligenz. »Trotz aller Rückschläge haben wir die Lektion noch nicht gelernt«, kommentiert Spencer. »Die natürliche Selektion wird am Ende immer gewinnen.« ◀

#### QUELLEN

**Gassmann, A. J.:** Field-Evolved Resistance to Bt Maize by Western Corn Rootworm: Predictions from the Laboratory and Effects in the Field. In: *Journal of Invertebrate Pathology* 110, S. 287–293, 2012

**Levine, E. et al.:** Adaptation of the Western Corn Rootworm to Crop Rotation: Evolution of a New Strain in Response to a Management Practice. In: *American Entomologist* 48, S. 94–107, 2002

**Lundgren, J. G., Duan, J. J.:** RNAi-Based Insecticidal Crops: Potential Effects on Nontarget Species. In: *BioScience* 63, S. 657–665, 2013

## 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. Tim Kalvelage, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator 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 Heinzemann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

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

**Redaktionsassistent:** Barbara Kuhn, Andrea Roth

**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

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

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

**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Claudia Hecker, Dr. Rainer Kayser, Dr. Ursula Loos, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de

**Vertretungsberechtigter:** Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wirtschaftskommunikation gGmbH (NaWiK).

**Bezugspreise:** Einzelheft € 8,50 (D/A/L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Gesamtbereichsleitung: Michael Zehntmaier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887 97-8550; Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg, Tel. 040 3280-189

**Druckunterlagen an:** iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 39 vom 1.1. 2018.

**Gesamtherstellung:** L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2018 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. 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.







# Spektrum LIVE

VERANSTALTUNGSREIHE ZUM  
40-JÄHRIGEN JUBILÄUM DES VERLAGS  
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

In unserem Jubiläumsjahr laden wir Sie zu spannenden Vorträgen, lehrreichen Seminaren und Workshops ein. Lernen Sie Wissenschaft mit **Spektrum** in einem neuen Format kennen – live!

Auftakt der Veranstaltungsreihe mit einem Vortrag des Geruchsforschers

**Prof. Dr. Dr. Dr. habil. Hanns Hatt**

**Wann?** 12. April 2018, 19.00 Uhr

**Wo?** Heidelberg Laureate Forum Foundation,  
Kurfürstenanlage 52, 69115 Heidelberg

Jetzt Ticket sichern!

**Spektrum.de/live**





SIMON KUMM & SUSANNE SCHLE / WWW.FLORIAN-FREISTETTER.DE/BIIDER.HTML / CC BY-SA 3.0 / CREATIVECOMMONS.ORG/licenses/by-sa/3.0/legalcode

# FREISTETTERS FORMELWELT SPIELERISCHE MATHEMATIK

**Manche mathematischen Fragestellungen klingen nach reinem, zweckfreiem Vergnügen – aber nur auf den ersten Blick. Bei genauerer Betrachtung steckt fast immer mehr dahinter.**

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.  
» spektrum.de/artikel/1527655

Stellen Sie sich vor, Sie wollen einen Garten mit zehn Apfelbäumen anlegen. Können Sie die Bäume so anordnen, dass es zwölf gerade Linien durch den Garten gibt, die jeweils genau drei Bäume treffen? Vermutlich haben Sie sich die Frage noch nie gestellt – macht nichts, die Antwort lautet Ja.

Es handelt sich um das so genannte Obstgartenproblem, und der britische Mathematiker James Joseph Sylvester (1814–1897) fand eine Formel für seine Lösbarkeit:

$$r \geq \left\lfloor \frac{1}{6}(n-1)(n-2) \right\rfloor$$

Hier bezeichnet  $n$  die Anzahl der Bäume und  $r$  die Anzahl der geraden Linien, die durch genau drei (punktförmige) Bäume gehen. Die merkwürdigen Klammern stehen für »Runden nach unten«:  $\lfloor x \rfloor$  ist die größte ganze Zahl  $\leq x$ . Die konkrete Anordnung der zehn Bäume, die wirklich zwölf solcher Geraden aufweist, ist weder offensichtlich noch besonders symmetrisch. Aber dank Sylvesters Formel wissen wir, dass sie existiert.

Seine Formel lässt sich auf Linien mit mehr als drei Bäumen verallgemeinern. Und sie hängt mit einer merkwürdigen Behauptung zusammen, die Sylvester 1893 aufstellte: Hat man eine vorgegebene Menge an Punkten, die alle in einer Ebene liegen, dann gibt es entweder eine Gerade, die durch exakt zwei von diesen Punkten verläuft, oder alle Punkte liegen auf einer Geraden. Wie so oft in der Mathematik ist dieser Satz leicht zu formulieren und zu verstehen, aber viel schwerer zu beweisen. Das gelang erst 1944 dem ungarischen Mathematiker Tibor Gallai, nachdem sich zuvor sein berühmter Landsmann Paul Erdős damit beschäftigt hatte. Heute heißt das Ergebnis Satz von Sylvester-Gallai.

Man mag ein wenig verwundert sein, warum sich Mathematiker mit solchen scheinbar unbedeutenden

Spielereien beschäftigen. Wer braucht denn schon einen Obstgarten mit dieser speziellen Anordnung? Bei derartigen Aussagen geht es jedoch nicht um die praktische Anwendung in der echten Welt. Der Mathematiker Joseph Malkevitch hat die Situation treffend zusammengefasst: »Manche leicht zu formulierenden Probleme in der Mathematik stechen trotz ihrer Schlichtheit heraus, weil sie nicht leicht zu lösen sind. Ein fruchtbares Problem kann jede Menge neue Ideen hervorbringen, die bis heute untersucht werden.«

Genauso war es auch beim Satz von Sylvester-Gallai. Seine Verallgemeinerungen spielen heute in der projektiven Geometrie und zahlreichen anderen Gebieten der Mathematik eine wichtige Rolle.

Hier zeigt sich etwas, was mich persönlich besonders fasziniert: Die Mathematik ist im Prinzip unerschöpflich. Sylvester selbst hat das in hervorragender Weise ausgedrückt: »Die Mathematik ist kein Buch, das von Buchdeckeln begrenzt wird. Sie ist kein Bergwerk, dessen Schätze nur eine endliche Anzahl von Adern füllen. Sie ist ohne Grenze. Ihre Möglichkeiten sind so unendlich wie die Welten, die sich im Blick der Astronomen drängen und sich unter ihrem Blick vervielfältigen.«

Als Astronom kann ich dieser poetischen Beschreibung der Mathematik nur voll und ganz zustimmen. Beiden Wissenschaften geht es hier gleich. Ob das Universum und seine Welten unendlich sind, wissen wir noch nicht. Wir wissen auch nicht, ob es irgendwann einmal keine neuen mathematischen Erkenntnisse mehr gibt und wir alle logisch denkbaren Zusammenhänge entdeckt haben werden. Aber ebenso wie die schiere Größe des Universums diese Frage irrelevant erscheinen lässt, legt auch die Komplexität der Mathematik nahe, dass wir noch für sehr lange Zeit neue Probleme finden und uns auf die Suche nach ihren Lösungen machen können.



Der Geologe Harrison Schmitt war der erste Wissenschaftsastronaut der US-Raumfahrtbehörde NASA und der bislang letzte Mensch auf dem Mond. Während der Apollo-17-Mission sammelte er zahlreiche Gesteinsproben.



# PLANETOLOGIE

## WIE ENTSTAND DER MOND?

**Ein gewaltiger Einschlag auf der jungen Erde lieferte das Baumaterial für unseren Trabanten? Neue Forschungsergebnisse lassen Zweifel an diesem LehrbuchszENARIO aufkommen. Planetologen suchen nun nach alternativen Erklärungen.**



**Rebecca Boyle** ist Wissenschaftsjournalistin in Saint Louis, Missouri.

► [spektrum.de/artikel/1527657](https://spektrum.de/artikel/1527657)

Am 13. Dezember 1972 ging der Apollo-17-Astronaut Harrison Schmitt auf einen Felsbrocken im Mare Serenitatis zu, um dort Proben zu nehmen. Der Geologe zog eine Harke durch den pudrigen Staub auf der Mondoberfläche und packte einige wenige Zentimeter große Steine ein. Ein Stück Troktolith erhielt die Katalognummer 76536 – und einen Platz in den Geschichtsbüchern.

Denn dieser Stein lieferte zusammen mit weiteren Felsbrocken wichtige Hinweise zum Ursprung des Mondes. Seit vier Jahrzehnten liest sich dessen Geschichte in zahlreichen Lehrbüchern und Ausstellungen wie folgt: Unser Trabant entstand nach einer katastrophalen Kollision zwischen der jungen Erde und einem marsgroßen Himmelskörper. Die Forscher nennen diesen heute Theia, nach der griechischen Göttin, die den Mond Selene geboren hat. Ins All geschleuderte Trümmer des Zusammenpralls verfestigten sich schließlich zu dem großen Begleiter, der heute unsere Erde umkreist.


Doch neuere Messungen an Troktolith 76536, einer weiteren an derselben Stelle gesammelten Probe mit der Nummer 76535 und an anderen Steinen vom Mond haben zu Zweifeln an dieser Geschichte geführt. Eine wachsende Anzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen zeigt, dass die allgemein akzeptierte Hypothese von einem gigantischen Einschlag nicht so gut zu den vorliegenden Indizien passt wie gedacht. Wenn Theia die Protoerde getroffen hätte und aus den Bruchstücken der Kollision der Mond entstanden wäre, dann sollte er den Simulationen zufolge vor allem aus Materie Theias bestehen. Doch der Mond ähnelt in dieser Hinsicht nicht dem marsähnlichen Objekt, als das sich die Forscher Theia vorstellen – sondern er gleicht nahezu exakt der Erde.

Mit dieser Diskrepanz konfrontiert, haben sich die Planetologen auf die Suche nach neuen Ideen für die Ent-

stehungsgeschichte des Mondes gemacht. Die offensichtlichste und vielleicht einfachste Lösung: Möglicherweise besteht der Mond tatsächlich aus Theia-Materie, aber Theias Zusammensetzung war nahezu identisch mit jener der Protoerde. Das würde allerdings an unserem Verständnis des frühen Sonnensystems rütteln. Eine zweite Erklärung wäre, dass der gewaltige Aufprall die unterschiedlichen Zusammensetzungen ähnlich gründlich durchmischt hat wie ein Rührgerät die Zutaten eines Kuchens. Das setzt entweder einen Einschlag mit außergewöhnlich hoher Energie voraus oder eine ganze Serie von Aufprällen, die jeder für sich kleine Monde produzierten, welche schließlich zu einem großen verschmolzen. Einer dritten Theorie zufolge könnten Erde und Mond eine Reihe

### AUF EINEN BLICK NEUE BIOGRAFIE DES MONDS

- 1** Lange Zeit waren Astronomen davon überzeugt, unser Mond sei nach einer katastrophalen Kollision zwischen der jungen Erde und einem etwa marsgroßen Himmelskörper entstanden.
- 2** Genauere Untersuchungen von Gesteinsproben sowie verbesserte Computersimulationen passen allerdings nicht mehr zu diesem einfachen Modell.
- 3** Komplexere Ansätze gehen von vielen kleineren Einschlägen aus oder von einer bislang hypothetischen Struktur aus verdampftem Gestein.



Künstlerische Darstellung einer Synestia, einer zum Rand hin dicker werdenden Scheibe aus verdampftem Gestein. Aus einem derartigen Gebilde könnte der Mond entstanden sein.

MIKE ZENG (ZAGERO.COM) FÜR QUANTA MAGAZINE

seltsamer Metamorphosen sowie dramatische Änderungen ihrer Umlaufbahnen und Rotationsgeschwindigkeiten durchlaufen haben – eine Herausforderung für bisherige Modelle zur Planetendynamik.

#### **Früher waren Zusammenstöße an der Tagesordnung – doch wie sahen die Kollisionspartner aus?**

Um zu verstehen, was am vielleicht bedeutendsten Tag der Erdgeschichte wirklich geschehen ist, hilft ein Blick auf die Situation im frühen Sonnensystem. Vor etwa viereinhalb Milliarden Jahren lag um die Sonne eine heiße, reifenförmige Wolke aus Trümmern. Sie wirbelten herum, kühlten ab und formten durch einen noch nicht ganz verstandenen Prozess erste Verdichtungen, dann Planetesimale und schließlich größere Planeten. Zwischen den Gesteinskörpern kam es immer wieder zu heftigen Zusammenstößen, bei denen sie erneut komplett zerschmettert wurden (siehe »Aufruhr in der Kinderstube«, **Spektrum** März 2017, S. 44). Unsere besten Computermodelle sagen: Um im Verlauf dieses kosmischen Billardspiels unseren heutigen Mond zu erhalten – von seiner Größe über die Eigendrehung bis zu der Rate, mit der er sich von der Erde allmählich entfernt –, muss ein etwa marsgroßer Körper mit der Erde zusammengeprallt sein.

Die ersten geochemischen Untersuchungen am Troktolith von Apollo 17 und an anderen Proben unterstützten dieses Szenario. Das Mondgestein musste aus einem Magmaozean stammen, wie er nur durch einen großen

Einschlag entstanden sein kann. Troktolith würde darauf treiben wie ein Eisberg im Südpolarmeer. Auf der Grundlage dieser physikalischen Bedingungen folgerten die Wissenschaftler zunächst, der Mond bestünde aus der Materie von Theia. Doch hiermit gibt es ein Problem.

Im frühen Sonnensystem verdampften die Himmelskörper durch heftige Zusammenstöße immer wieder, und ihre Bestandteile sammelten sich in unterschiedlichen Regionen des Sonnensystems an. Durch die Hitze der Sonne entwichen leichtere Elemente in weiter entfernt liegende Gebiete. So bildete sich im inneren Sonnensystem ein Überschuss an schweren Isotopen heraus, das heißt an Varianten von Elementen, die zusätzliche Neutronen enthalten. In größerer Entfernung hatte das Gestein einen höheren Anteil an Wasser und leichteren Atomen. Deshalb können Wissenschaftler heute an der Isotopenzusammensetzung ablesen, aus welcher Region des Sonnensystems ein Objekt kommt. Diese Abweichungen sind ausgeprägt genug, um sich zur Klassifizierung von Planeten und Meteoriten zu eignen. Bereits unser Nachbar Mars unterscheidet sich stark von der Erde, und seine Meteoriten lassen sich durch den Vergleich dreier Sauerstoffisotope identifizieren.

Forscher aus der Schweiz und den USA maßen 2001 mit Hilfe fortschrittlicher Massenspektroskopie die Isotopenverhältnisse von Troktolith 76536 sowie von 30 weiteren Mondproben. Das Verhältnis der Sauerstoffisotope war von dem der Erde nicht zu unterscheiden. Inzwischen haben andere Geophysiker außerdem die Isotope von



Titan, Wolfram, Chrom und vielen weiteren Metallen auf der Erde und auf dem Mond verglichen. Bei allen waren die Werte nahezu identisch.

Mond und Erde ähneln sich also stärker gedacht. Demnach aber muss der Mond aus geschmolzenem Material der Erde entstanden sein. »Das allgemein anerkannte Modell befindet sich in einer ernsten Krise«, resümiert Sarah Stewart von der University of California in Davis die neuen Ergebnisse. Stewart hat versucht, die notwendigen physikalischen Umstände – die Kollision mit einem Himmelskörper einer bestimmten Größe und Geschwindigkeit – mit den jüngsten geochemischen Daten in Einklang zu bringen. Gemeinsam mit Matija Čuk, der heute am kalifornischen SETI Institute tätig ist, schlug sie 2012 ein neues Modell für die Entstehung des Mondes vor. Laut diesem rotierte die junge Erde rasant – ein Tag war nur zwei oder drei Stunden lang – als Theia mit ihr zusammenstieß. Die Kollision erzeugte eine Scheibe um die Erde, ähnlich den Ringen um Saturn. Diese kühlte ab und verdichtete sich allmählich zum Mond.

### Neuer Mitspieler im Wettbewerb der Modelle: Eine riesige Wolke aus verdampftem Gestein

Selbst die Rechenleistung von Supercomputern reicht nicht aus, um diesen Prozess vollständig zu simulieren. Aber zumindest grundsätzlich könnte ein Aufprall auf einen derart schnell rotierenden Planeten einen großen Teil Theias zerstören, ausreichend Elemente beider Körper durchmischen und genug Materie ins All auswerfen, um eine Erde und einen Mond mit ähnlichen Isotopenverhältnissen zu erschaffen.

Die Hypothese kann jedoch nur richtig sein, wenn es einen weiteren Effekt gab, der die Drehung der Erde auf ihren heutigen Wert abgebremst hat. Stewart und Čuk argumentierten, bestimmte Bahnresonanzen könnten zu einem Transfer des irdischen Drehimpulses auf die Sonne geführt haben. Später schlug Jack Wisdom vom Massachusetts Institute of Technology noch eine Reihe alternativer Ideen vor, um Drehimpuls aus dem Erde-Mond-System abzuführen.

Doch keine dieser Überlegungen war vollkommen zufrieden stellend. Die Modelle konnten weder die Bahn des Mondes noch seine chemische Zusammensetzung hinreichend erklären. 2017 präsentierte dann Stewarts Student Simon Lock von der Harvard University ein neues Bild. Es basierte auf einer bis dahin unbekanntem, spektakulären planetarischen Struktur.

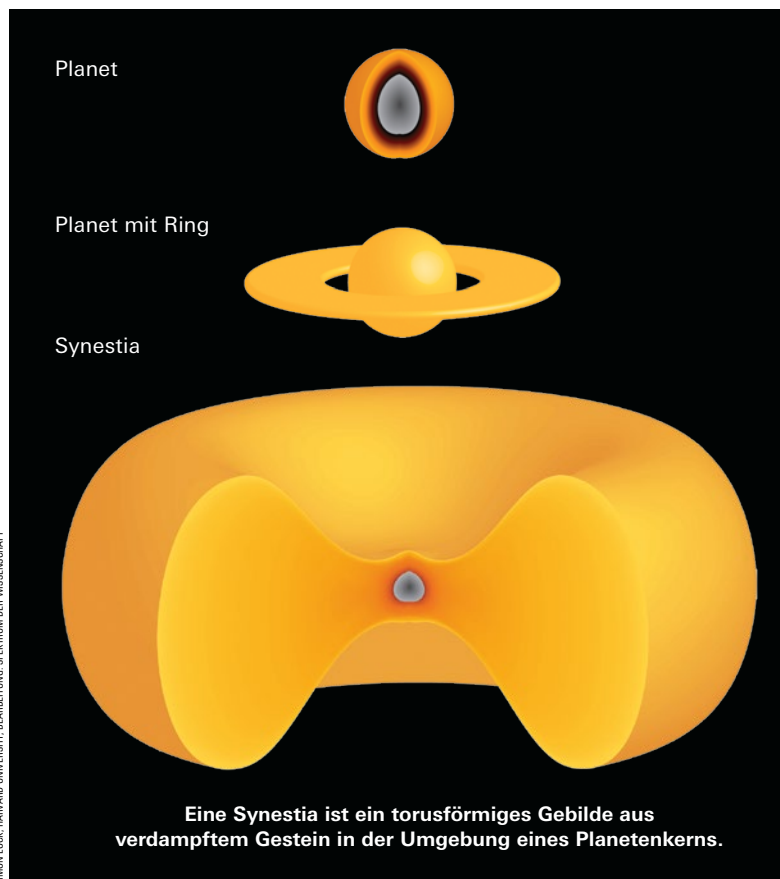
In diesem Szenario verdampfen die junge Erde und Theia vollständig und bilden eine aufgeblähte Wolke in Form eines dicken, ringähnlichen Objekts. Das Gebilde rotiert extrem schnell und erreicht seine »Korotationsgrenze«, die maximale Geschwindigkeit, mit der sich ein Körper drehen kann, ohne zerrissen zu werden. Die Wolke nimmt eine charakteristische Form ein, bei der eine breite Scheibe eine flachere innere Region umschließt. Entscheidend dabei: Beide sind nicht voneinander entkoppelt, wie es etwa bei den Saturnringen und auch bei früheren Modellen der Mondentstehung der Fall ist, sondern sind miteinander verbunden.

In dieser Struktur herrschen höllische Bedingungen. Es gibt keine feste Oberfläche, nur Wolken aus Gesteinsdampf, in denen sich überall Tropfen aus flüssigem Gestein bilden. Lock zufolge beginnt der Mond darin zu wachsen, bevor der Dampf abkühlt und schließlich das Erde-Mond-System hinterlässt.

Da die Struktur so ungewöhnlich ist, musste sie nach Ansicht von Lock und Stewart auch einen besonderen Namen haben. Nach einer Reihe von Versuchen einigten sie sich auf »Synestia« aus der griechischen Vorsilbe »syn« für »zusammen« und Hestia, der griechischen Göttin des Herdfeuers und der häuslichen Ordnung. Insgesamt soll die Bezeichnung für »verbundenes Gefüge« stehen.

Lock und Stewart haben ihre Arbeiten zu Synestias auf Tagungen von Planetenforschern präsentiert. Die Fachkollegen zeigten sich zwar interessiert, aber nicht überzeugt. Vielleicht weil niemand bisher eine solche Erscheinung gesehen hat – im Gegensatz zu den vergleichsweise langlebigen Ringen, von denen es viele im Sonnensystem gibt, und zu den protoplanetarischen Scheiben, die Astronomen im Kosmos beobachten können. Lock ist dennoch zuversichtlich: »So erklären wir die Eigenschaften des Mondes und überwinden dabei die Hürden, vor die uns das alte Modell derzeit stellt.«

Unter den Satelliten der Planeten des Sonnensystems ist der einzige Begleiter der Erde etwas Besonderes. Merkur und Venus besitzen gar keine Monde, unter anderem weil sie sich so nahe an der Sonne befinden; deren



Anziehungskraft destabilisiert etwaige Bahnen um die Planeten. Mars hat mit Phobos und Deimos zwei kleine Trabanten, bei denen es sich um eingefangene Asteroiden handeln könnte oder ebenfalls um Trümmer von Einschlägen. Die großen Gasplaneten besitzen gleich Dutzende von Monden – einige aus Gestein, andere aus Eis, manche aus beidem.

Im Vergleich dazu fällt der irdische Trabant durch seine Größe und seine physikalischen Eigenschaften aus dem Rahmen. Der Mond besitzt etwa ein Prozent der Masse der Erde. Die Summe der Massen aller Monde beträgt bei den äußeren Planeten dagegen weniger als ein Zehntel Prozent ihres jeweiligen Planeten. Zudem steckt ein Großteil des Gesamtdrehimpulses des Erde-Mond-Systems in der Bahnbewegung. Bei den äußeren Planeten liegt dieser Anteil jeweils bei weniger als einem Prozent.

Möglicherweise ist der Mond nicht von Anfang an so massiv gewesen. Die von Kratern überzogene Oberfläche des Erdtrabanten zeugt eindrücklich von einem lebenslangen Bombardement. Warum also sollten wir annehmen, dass ein einziges Ereignis den Mond aus der Erde herausgebrochen hat? Ebenso könnten viele Einschläge allmählich den heutigen Mond aufgebaut haben, vermutet Raluca Rufu, Planetenforscherin am Weizmann Institute of Science in Rehovot, Israel.

### **Vielleicht waren sich die Erde und Theia doch ähnlicher als gedacht**

In einer 2016 veröffentlichten Arbeit behauptet sie, der heutige Mond der Erde sei nicht ihr ursprünglicher Begleiter. Vielmehr sei er das Ergebnis tausender – oder zumindest dutzender – Einschläge. Rufus Simulationen zeigen Projektilen, die aus verschiedenen Richtungen und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf die Erde treffen. Sie erzeugen jeweils Scheiben, aus denen sich »Moonlets« bilden, kleine Monde. Diese unterschiedlich alten Moonlets verschmelzen schließlich miteinander. Rufus Fachkollegen haben den Vorschlag wohlwollend aufgenommen. Robin Canup, eine Astrophysikerin am Southwest Research Institute und eine der renommiertesten Expertinnen für Kollisionstheorien, hält den Ansatz für wert, sich näher damit zu beschäftigen. Weitere Tests sind jedenfalls nötig: Rufu will herausfinden, ob solche Moonlets gebunden rotiert wären wie der heutige Mond, also der Erde stets die gleiche Seite gezeigt hätten. Das nämlich würde eine Verschmelzung der Himmelskörper erschweren.

Andere Forscher haben sich inzwischen einer weiteren, sehr einfachen Erklärung für die geochemischen Übereinstimmungen von Mond und Erde zugewendet. Vielleicht

sind all die neuen physikalischen Modelle, von Synestias bis zu Moonlets, völlig überflüssig – wenn sich nämlich das Material weitgehend gleicht, weil bereits Theia der Erde ähnelte.

Der Mond ist nicht das einzige Objekt im Sonnensystem, das in seiner Zusammensetzung der Erde gleicht. Gesteinsproben wie Troktolith 76536 teilen ihr Sauerstoffisotopenverhältnis mit einer als Enstatit-Chondrite bezeichneten Art von Meteoriten. Sie stammen aus einer wärmeren, sonnennäheren Region – sind also in der Umgebung der Erde entstanden. Vielleicht verschmolzen einige solcher Felsbro-

## **Warum sollte ein einziges Ereignis verantwortlich sein? Ebenso könnten viele Einschläge allmählich den Mond aufgebaut haben**

cken zur Erde, aus anderen bildete sich Theia. Die Enstatit-Chondriten wären dann der übrig gebliebene Schutt.

Das zumindest behauptete Nicolas Dauphas, Geophysiker an der University of Chicago, Anfang 2017. Die meisten Gesteinsbrocken, aus der die Erde entstand, seien Meteoriten des Enstatit-Typs gewesen. Und für alle anderen Körper, die sich in derselben Region gebildet haben, gelte das ebenfalls. Der Ausgangsstoff der Planeten in dieser Region war genau das Material, das wir nun im Mond und in der Erde finden, und die beiden Körper ähneln sich, einfach weil sie aus der gleichen Substanz hervorgegangen sind.

David Stevenson, Planetenforscher am California Institute of Technology, befasst sich bereits seit 1974 mit der Entstehung des Mondes – dem Jahr, in dem die Theia-Hypothese erstmals präsentiert wurde. Er sieht in Dauphas' Behauptung den wichtigsten Beitrag zur aktuellen Debatte, denn sie löse ein Problem, mit dem sich die Geochemiker seit Jahrzehnten herumplagen. »Er geht die Sache quantitativ an, indem er sich die Ausgangselemente der Erde anschaut«, sagt Stevenson. »Von da aus kann er die Entstehungsgeschichte rückwärts abspielen, und dabei nehmen dann die Enstatit-Chondriten eine wichtige Rolle ein.«

Doch nicht alle Forscher sind von dieser Idee überzeugt. Fragen etwa zum Isotopenverhältnis von Elementen wie Wolfram blieben offen, betont Stewart. Wolfram-182 ist ein Tochterelement von Hafnium-182, weshalb sich das Verhältnis von Wolfram zu Hafnium zur Altersbestimmung nutzen lässt. Im Lauf der Entwicklung von Erde und Mond hätten sich die Metalle unterschiedlich stark in den jeweiligen Kernen und den silikatischen Mänteln verteilen müssen – doch den bislang genauesten Messungen zufolge ist das Wolfram-Hafnium-Verhältnis der beiden Himmelskörper gleich. Dauphas erkennt dieses Problem in seiner Veröffentlichung an: »Sehr spezielle Koinzidenzen wären nötig, damit zwei Körper mit heute derart übereinstimmenden Zusammensetzungen entstehen.«



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

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

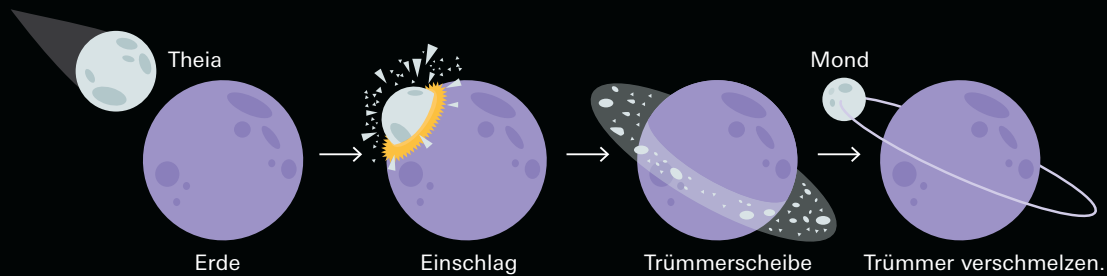


# Vier Rezepte für unseren Mond

Angesichts präziserer Messungen und leistungsfähigerer Computersimulationen entwickeln Planetenwissenschaftler immer wieder neue Szenarien, wie unser Trabant entstanden sein könnte.

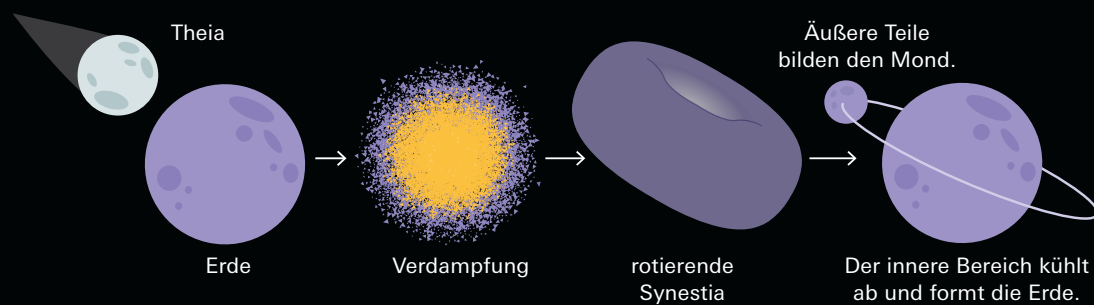
## 1 DER GROSSE EINSCHLAG

Ein etwa marsgroßer, felsiger Himmelskörper namens Theia kollidierte mit der Protoerde. Der Einschlag erzeugte eine Trümmerscheibe um die junge Erde, aus der sich der Mond bildete. Diese Theorie wurde bereits in den 1970er Jahren entwickelt und galt lange Zeit als wahrscheinlichste Variante. Neuere Untersuchungen weisen jedoch auf Probleme hin: Computersimulationen zufolge sollte der Mond hauptsächlich aus Materie von Theia bestehen; geochemisch ist der Mond aber aus nahezu dem gleichen Material aufgebaut wie die Erde.



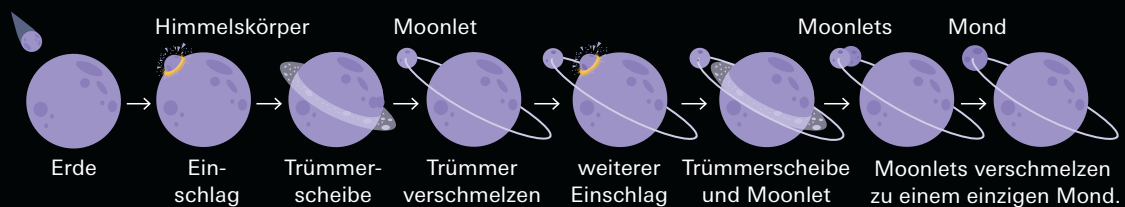
## 2 SYNESTIA

Vielleicht traf Theia die Erde mit so großer Energie, dass beide Körper komplett verdampften und eine bisher hypothetische Struktur erzeugten, eine »Synestia«. In dieser rotierenden Wolke aus heißen Trümmern wäre die Materie von Theia und der Erde gründlich durchmischt worden.



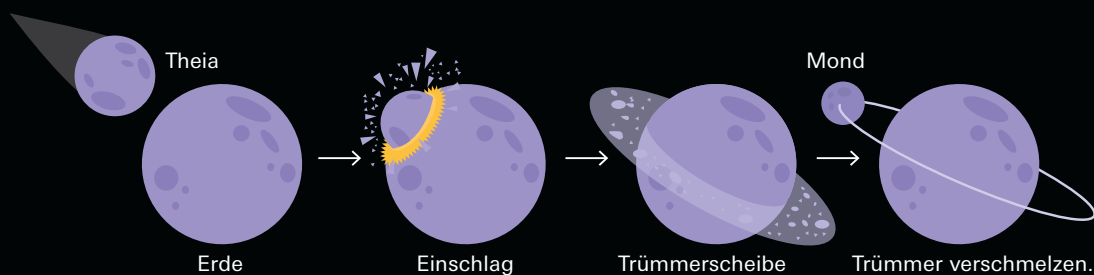
## 3 KLEINE MONDE

Statt eines einzigen großen Einschlags könnte es viele kleinere gegeben haben. In diesem Modell erzeugt jeder Körper, der mit der Erde zusammenstößt, eine Trümmerscheibe, aus der sich ein kleiner Mond – ein Moonlet – bildet. Die Moonlets prallen aufeinander und verschmelzen.



## 4 ZWILLINGSKOLLISION

Vielleicht besaß Theia von vornherein die gleiche Zusammensetzung wie die junge Erde. Das allerdings zieht einiges in Zweifel, was wir heute über die Entstehung von Planetensystemen zu wissen glauben.



**Sarah Stewart und ihr Student Simon Lock meinen, der Mond könnte aus einer Wolke verdampften Gesteins hervorgegangen sein. Sie vermuten solche – bislang hypothetischen – Strukturen auch an anderen Stellen im All.**



UC DAVIS

Unseren ständigen himmlischen Begleiter besser zu verstehen, ist bereits für sich genommen ein faszinierendes Forschungsprojekt. Aber seine Geschichte ist nur ein Kapitel in einem größeren Epos. »Ich sehe es als Fenster in das frühe Sonnensystem: Was geschah, als sich die terrestrischen Planeten bildeten?«, erklärt David Stevenson.

Vielleicht liefern Synestias die Antwort auf diese Frage. Lock und Stewart vermuten, im frühen Sonnensystem seien zahlreiche solcher aufgeblähten Wolken verdampften Gesteins entstanden, als Protoplaneten immer wieder aufeinanderprallten und schmolzen. Die Erforschung von Synestias könnte also dabei helfen, auch die Entwicklung anderer Planetensysteme zu verstehen.

Weitere Gesteinsproben vom Mond und von der Erde, insbesondere aus den Mänteln der beiden Körper, würden den Geochemikern mehr Daten liefern. Untersuchungen könnten zeigen, ob die Sauerstoffisotope überall gleich häufig auftreten – oder ob verschiedene Isotope gewisse Regionen bevorzugen. »Die Aussage, Erde und Mond seien bezüglich der drei stabilen Sauerstoffisotope nahezu identisch, steht und fällt mit unseren Annahmen über den Aufbau der beiden Himmelskörper«, stellt Stevenson fest.

Komplexe Computersimulationen zum jungen Sonnensystem führen oft zu neuen Feinabstimmungen der Theorien über die Planetenbildung und liefern Hinweise darauf, wo die Planeten herkommen und auf welchen Bahnen sie gewandert sind. Immer mehr Wissenschaftler hinterfragen, ob uns ausgerechnet der Mars hilft, die Geschichte besser zu verstehen. Denn möglicherweise ist er an anderer Stelle entstanden als die Erde, Theia und die Enstatiten. Der Mars, so Stevenson, ist vielleicht gar nicht so ein gutes Beispiel für einen Gesteinsplaneten. Viele Mondforscher meinen stattdessen, bessere Antworten ließen sich auf der Venus finden. Dieser Planet ist bezüglich Größe und Masse nahezu ein Zwilling der Erde. Vielleicht gilt das

auch für die Zusammensetzung ihres Gesteins, und möglicherweise hat die Venus in ihrer Jugend einen Mond besessen und wieder verloren. Doch das sind nur Vermutungen. »Wenn wir eine Gesteinsprobe von der Venus hätten, könnten wir die Mondentstehung einfacher nachzeichnen. Aber leider steht so eine Mission gegenwärtig bei niemandem auf der Prioritätenliste«, sagt Lock.

Solche Einblicke sind also nicht zu erwarten, und ebenso fehlen Labore, in denen sich die unvorstellbaren Drücke und Temperaturen der Kollisionen aus dem frühen Sonnensystem nachstellen ließen. So bleibt den Wissenschaftlern nur, weiter neue Modelle zu entwickeln und durchzurechnen – und damit die Geschichte der Mondentstehung immer wieder zu revidieren. ◀

#### QUELLEN

**Čuk, M., Stewart, S.T.:** Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning. In: *Science* 338, S. 1047–1052, 2012

**Dauphas, N.:** The Isotopic Nature of the Earth's Accreting Material Through Time. In: *Nature* 541, S. 521–524, 2017

**Lock, S.J., Stewart, S.T.:** The Structure of Terrestrial Bodies: Impact Heating, Corotation Limits and Synestias. In: *Journal of Geophysical Research: Planets* 122, S. 950–982, 2017

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »What Made the Moon? New Ideas Try to Rescue a Troubled Theory« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

 **Quanta**magazine



Spektrum der Wissenschaft SPEZIAL 1.18

Biologie Medizin Hirnforschung

# Spektrum SPEZIAL

## Neue Fronten der Hirnforschung

Das Wechselspiel  
von Außen- und Innenwelt



**ORIENTIERUNG** Unsere inneren Landkarten  
**PLASTIZITÄT** Lernen leicht gemacht, selbst im Schlaf  
**DARMFLORA** Ihr Einfluss auf das Gehirn



Ab 26.1.  
im Handel

# Jetzt fast 35% sparen!

## Eine Ausgabe für nur € 5,90 statt € 8,90

So geht's:

1. eazers App im Store herunterladen
2. Gutschein auswählen
3. Händler in der Nähe anzeigen lassen
4. Gutschein beim ausgewählten Händler einlösen

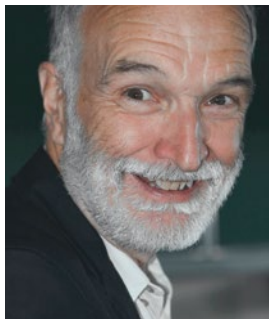


eaz  
ers

günstiger lesen mit  
[www.eazers.com](http://www.eazers.com)



# SCHLICHTING! SURFENDE WASSERTROPFEN



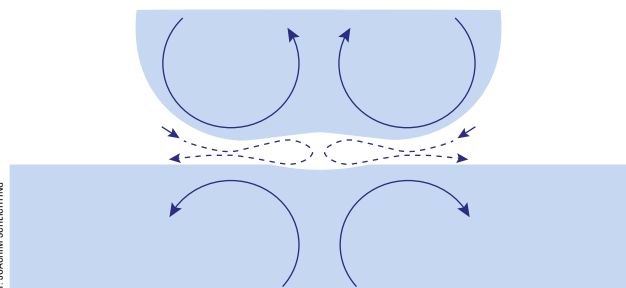
**Manche Wassertropfen driften eine Zeit lang auf einer Wasseroberfläche, ohne sofort mit dieser zu verschmelzen. Das könnte an einem Luftpolster liegen, doch womöglich sind die physikalischen Effekte komplizierter als gedacht.**

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/1527659](http://spektrum.de/artikel/1527659)

Wenn ich an einem Springbrunnen sitze, achte ich neuerdings immer wieder auf die winzigen Tropfen, die jeweils kurze Zeit über die Wasseroberfläche im Becken treiben. Ich warte dann auf den Moment, in dem sie mit der Oberfläche verschmelzen. Die flinken Tröpfchen verschwinden plötzlich und spurlos. Das unterscheidet sie von den meist größeren, träge auf dem Wasser ruhenden Blasen. Es drängt sich aber die Frage auf, warum die Tropfen überhaupt noch eine kleine Weile auf der Oberfläche kursieren und sich nicht sofort mit dem Wasser vereinigen, obwohl sie doch aus demselben Stoff bestehen.

Das Phänomen erinnert mich an einen ähnlichen Vorgang beim Kaffeezubereiten: Wenn der Kaffee vom Filter in die Kanne tropft, huschen oft ebenfalls kleine Kugeln über die Oberfläche des Getränks, um nach ihrem kurzen Ausflug ebenso unvermittelt zu verschwinden wie ihre Verwandten auf dem Teichwasser. In diesem Fall ist die Situation etwas anders, weil ein Temperaturunterschied zwischen der schon etwas abgekühlten Kaffeeoberfläche und dem heißen Tröpfchen besteht. Die Grenzflächenspannung ist nämlich temperaturabhängig,



Das Strömungsfeld eines heißen Tropfens über einer kühleren Wasseroberfläche führt Umgebungsluft in die Zwischenschicht. Der Abstand ist übertrieben dargestellt, um die Bewegung des mitgenommenen Luftfilms zu zeigen.

und durch einen Marangoni-Strömung genannten Effekt wird Flüssigkeit von einer Stelle mit einer geringeren Oberflächenspannung zu einer mit höherer transportiert. Das entspricht hier einer Ausgleichsströmung von der warmen Seite zur kühleren. Nähert sich ein heißer Tropfen der Oberfläche des Kaffees, erkaltet er an der Unterseite. Die dorthin laufende Mikroströmung von wärmeren Bereichen reißt angrenzende Luftpartikel mit und bildet temporär ein Luftpolster (siehe Illustration unten).

Im Prinzip kennen wir so etwas vom Leidenfrost-Effekt bei langlebigen Wassertropfen auf einer heißen Herdplatte (siehe »Wassertropfen auf der Rennbahn«, **Spektrum** Dezember 2016, S. 48). Von Temperaturdifferenzen zwischen Tropfen und Wasseroberfläche kann bei meinen Beobachtungen am Springbrunnen allerdings kaum die Rede sein. Offenbar ist dort trotz der phänomenologischen Ähnlichkeit ein anderer Effekt im Spiel.

Da die Erscheinung relativ leicht zu beobachten ist, haben sich Wissenschaftler schon früh damit auseinandergesetzt. Als Erster veröffentlichte 1889 Lord Rayleigh (1842–1919) Arbeiten dazu. Er hielt für den Zeitpunkt der Verschmelzung vor allem die Verdrängung der Luftschicht für ausschlaggebend. Bei seinen Untersuchungen stellte er zahlreiche Einflussfaktoren fest. Dazu zählen etwa die Oberflächenspannung, Viskosität und Löslichkeit der aufeinandertreffenden Substanzen sowie Verunreinigungen und statische elektrische Ladungen.

Die wissenschaftliche Diskussion ist seitdem nie ganz abgeflaut. Unter kontrollierten Bedingungen lässt sich die Menge der Einflussfaktoren immerhin verkleinern. Beschränkt man sich auf Tropfen aus reinem Wasser, die man auf eine ebenso reine Wasseroberfläche fallen lässt, ergibt sich folgender Forschungsstand: Ab einer bestimmten Mindesthöhe verschmilzt der Tropfen stets unmittelbar.

Auf unseren Springbrunnen bezogen heißt das, die aus relativ großer Höhe herunterfallenden Wassertropfen



Einzelne Tropfen, die aus der richtigen Höhe aufs Wasser treffen, driften manchmal noch ein wenig über die Oberfläche, bevor sie untergehen.



WILFRIED SUHR, MIT FROL GEN. VON H. JOACHIM SCHLICHTING

bleiben nicht selbst auf der Wasseroberfläche, sondern lösen durch ihren Aufprall Sekundärtropfen heraus. Diese fallen dann aus hinreichend niedriger Höhe zurück, wobei sich einige von ihnen einer sofortigen Vereinigung entziehen, um noch ein wenig umherzudriften. In den Laborexperimenten zeigte sich zudem, was wir von den auf dem Kaffee tanzenden heißen Tropfen kennen. Ab einer bestimmten Temperaturdifferenz zwischen Tropfen und Flüssigkeit lässt sich die Verschmelzung sehr lange hinauszögern. Das erreicht man auch, wenn man die Flüssigkeitsoberfläche in Schwingung versetzt. Anschaulich gesprochen unterbricht die Bewegung die einsetzenden Vermischungsvorgänge immer wieder. Außerdem kann man, wie bereits Lord Rayleigh festgestellt hat, den Zusammenschluss durch einen gezielten Einsatz elektrischer Ladungen verlangsamen oder beschleunigen.

Die wohl am weitesten verbreitete und am ehesten akzeptierte Erklärung für die driftenden Tropfen ist die Luftkissenhypothese. Demnach unterbleibt die Vereinigung so lange, bis die zwischen den Grenzflächen eingeschlossene Luft verschwunden ist. Viele Wissenschaftler sehen eine Bestätigung dafür insbesondere in »newtonschen Ringen« zwischen dem Tropfen und der Oberfläche. Sie sind der Ausdruck eines Interferenzphänomens, bei dem Lichtwellen in einer dünnen Luftschicht von der Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Lichts gebrochen, reflektiert und zur Überlagerung gebracht werden. Das löscht bestimmte Anteile des Spektrums aus oder verstärkt sie, was sich an Stellen jeweils gleicher Schichtdicke durch farbige Ringe zeigt.

Allerdings führen einige Forscher alternative Erklärungen gegen die vermeintlichen Beweise an. So lasse die Reproduzierbarkeit des Phänomens zu wünschen übrig. Bei noch so großen Bemühungen, gleiche Ver-

suchsbedingungen einzuhalten, wären sowohl sofortige Verschmelzungen als auch lange Lebensdauern der Tropfen feststellbar. Aus der Luftkissenhypothese sollte im Übrigen folgen, dass bei abnehmendem Luftdruck die Luftschicht zwischen Tropfen und Flüssigkeit ausgedünnt und damit die Verweildauer drastisch reduziert würde. Bei Wasser ist das aber mitnichten der Fall. In einigen Versuchen stellte man im Gegenteil sogar eine längere Lebensdauer fest.

Vor diesem Hintergrund schlagen einige Forscher ein anderes Modell für das Phänomen vor. Sie zeigen, dass auf der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft teilweise größere Schichten geordneter Wassermoleküle existieren. Diese könnten – so ihre Argumentation – wie eine Barriere wirken und ähnlich wie bei der Luftkissenhypothese die Wassermoleküle des Tropfens so lange auf Abstand halten, bis die Schicht weit genug ausgedünnt ist. Erst dann überwiegen die molekularen Anziehungskräfte und führen eine Vereinigung herbei.

Das Geheimnis der driftenden Tropfen ist also noch nicht vollständig gelüftet. Das macht es umso spannender, sie am Springbrunnenteich und anderswo weiter zu beobachten.

#### QUELLEN

**Klyuzhin, I. S. et al.:** Persisting Water Droplets on Water Surfaces. In: Journal of Physical Chemistry B 114, S. 14020–14027, 2010

**Neitzel, G. P., dell’Aversana, P.:** Noncoalescence and Nonwetting Behavior of Liquids. In: Annual Review of Fluid Mechanics 34, S. 267–289, 2002

#### WEBLINK

[www.spektrum.de/artikel/1527659](http://www.spektrum.de/artikel/1527659)

In der Onlineversion dieses Artikels zeigt ein kurzes Video das Phänomen der flitzenden Tropfen am Springbrunnen.

**Und müssen Tropfen fallen,  
wenn wir entzückt werden sollen?**  
Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832)

# INTERVIEW

## SIEGESZUG DER QUANTEN

Schon in den nächsten Monaten könnten Quantencomputer klassische Rechner überholen, zumindest bei einer maßgeschneiderten Aufgabe. Im Interview verrät der Physiker John Martinis, worauf es dabei ankommt – und worum es seinem Arbeitgeber Google wirklich geht.

» [spektrum.de/artikel/1527661](http://spektrum.de/artikel/1527661)

Statt auf Halbleiter-Transistoren, die in gewöhnlichen Computern jeweils ein Bit repräsentieren (das je nach anliegender Spannung entweder den Wert 0 oder 1 hat), basieren Quantencomputer auf so genannten Quantenbits (Qubits). Dank dem quantenphysikalischen Prinzip der Superposition können diese im Vorfeld einer Messung zwei Werte gleichzeitig repräsentieren: 0 und 1. Bei bestimmten Rechenproblemen bringt das Vorteile – zumindest auf dem Papier. Tatsächlich gibt es bislang keinen vollwertigen Quantencomputer. Allerdings arbeiten viele Wissenschaftler daran und setzen dabei zum Teil auf unterschiedliche Qubit-Typen. Dieser Tage nähern sich mehrere

Teams einer symbolträchtigen Schwelle, der so genannten Quantum Supremacy: dem Punkt, an dem ein Quantenrechner erstmals eine klassische Maschine übertrumpft.

John Martinis könnte diesen Meilenstein als Erster erreichen. Der kalifornische Physiker entwickelt an der University of California in Santa Barbara und am dortigen Google-Forschungszentrum einen Quantencomputer auf Basis von supraleitenden Schaltkreisen. Er und sein Team wollen bereits Anfang 2018 die Überlegenheit der Quanten demonstrieren. Spektrum der Wissenschaft sprach mit Martinis im November 2017.

**Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Martinis, lange war der Quantencomputer eine Art mystische Maschine, die immer, wenn man nachfragte, etwa zehn Jahre in der Zukunft lag – ungefähr so wie der Fusionsreaktor. Aber plötzlich kündigt Ihr Team, das seit einigen Jahren für den Internetkonzern Google arbeitet, einen Prototyp mit 49 Quantenbits (Qubits) für das Frühjahr 2018 an. Wie zuversichtlich sind Sie, dass Sie die Maschine zum Laufen bringen?**

John Martinis: Wir kommen gut voran. Vor Kurzem haben wir einen Apparat mit 22 Qubits getestet, und nun haben wir mit der Arbeit an dem größeren Gerät begonnen. Aber wichtiger als der Zeitplan ist natürlich, einen Quantencomputer sorgfältig aufzubauen und einzustellen. Einige Probleme haben wir schon beseitigt, aber ein paar müssen wir noch lösen.

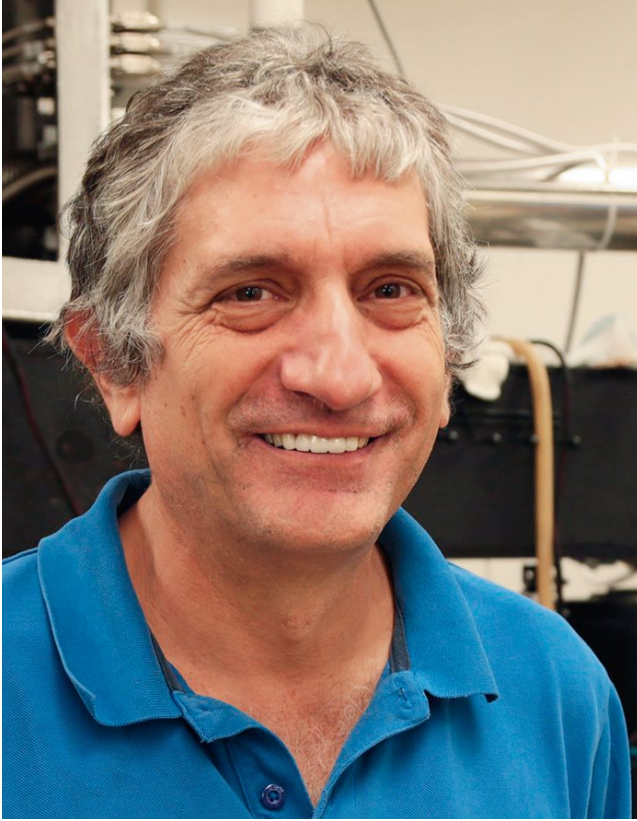
**Die 49 Qubits sind in einem Raster von sieben mal sieben angeordnet. Wie sieht der 22er aus?**

Er hat zwei Reihen von elf Qubits. Wir haben dieses Layout gewählt, weil wir es aus einem früheren Prototyp weiterentwickeln konnten. Das war recht einfach herzustellen, ließ sich schnell verkabeln und passte gut in den Kryostaten (die Kühlvorrichtung, in der sich der Quantencomputer befindet, *Anm. d. Red.*). Und 22 Qubits waren ungefähr die Hälfte auf dem Weg zum Ziel.

**Wird die zweite Hälfte des Wegs einfacher oder schwieriger als die erste?**

Damit ein Computer mit 49 Qubits funktioniert, muss man lernen, die einzelnen Einheiten automatisch zu kalibrieren und hochzufahren. Dafür braucht man viel Software und ausgeklügelte Produktionsverfahren. Diese Prozeduren ha-





SPENCER BRUTTIG, UCSB

### **John M. Martinis**

studierte an der University of California in Berkeley Physik und promovierte 1987 mit einer Arbeit über Qubit-Zustände in Supraleitern. Anschließend forschte er am Commissariat für Atomenergie in Frankreich und am National Institute of Standards and Technology im US-Bundesstaat Colorado. 2004 kehrte Martinis nach Kalifornien zurück und ist heute Professor an der University of California in Santa Barbara. Seit 2014 arbeitet er für Google an der Verwirklichung eines Quantencomputers.

ben wir intensiv am 22er-Chip getestet. Das hat etwas Zeit gekostet, aber nun fällt uns das Hochskalieren hoffentlich umso leichter.

#### **Woraus besteht bei Ihnen ein einzelnes Qubit?**

Im Kern ist es ein Mikrowellen-Oszillator, ein kleines Kreuz aus Metall, das sozusagen einen Kondensator und eine Spule enthält. Zwischen den beiden fließen die ganze Zeit Ströme hin und her, mit einer Frequenz von fünf bis sechs Gigahertz. Dazu kommt ein supraleitender Josephson-Kontakt. Darunter verstehen Physiker einen hauchdünnen Isolator, der zwei Supraleiter trennt. Durch diese Schnittstelle können gekoppelte Elektronen hindurchtunneln.

#### **Was ist an diesem Aufbau quantisiert?**

Da muss ich ein wenig ausholen. Normalerweise gilt Quantenmechanik als die Wissenschaft von Atomen. Elektronen umkreisen Kerne und können definierte, voneinander getrennte stabile Energieniveaus einnehmen. Und aus einzelnen Atomen kann man auch Qubits konstruieren, in denen die Elektronen in einer Überlagerung mehrerer möglicher Zustände sein können. Das machen Leute wie Christopher Monroe von der University of Maryland oder Rainer Blatt an der Universität Innsbruck mit ihren Ionenfallen. Darin verschränken die Forscher mehrere der Quantenobjekte miteinander und wollen so ebenfalls einen Quantencomputer bauen. Unsere Qubits enthalten hingegen Milliarden von Atomen, aber wegen der Supraleitung entscheidet die Quantenmechanik über die kollektive Bewegung der Elektronen. Der Isolator im Josephson-Kontakt ermöglicht es uns, genau zwei unterschiedliche Übergänge anzusprechen, die sich dann überlagern können.

#### **Milliarden von Atomen: Ihre Qubits sind also makroskopische Objekte? Dann kann man sie mit bloßem Auge sehen?**

Da brauchen Sie schon gute Augen. Unsere Qubits sind weniger als einen halben Millimeter groß, was aber natürlich riesig ist für die üblichen Dimensionen der Quantenphysik. Normalerweise würde man auf so einen elektrischen Schaltkreis auch klassische Physik anwenden, so dass es dort *einen* Strom und *eine* Spannung gibt. Aber hier sind die Spannungen und Ströme quantenmechanische Größen, die von einer Wellenfunktion beschrieben werden. Das bedeutet, dass die Ströme in unseren Qubits zugleich in die eine und die andere Richtung fließen. Genau wie es beim Atom mit der Bewegung des Elektrons um den Kern ist. Es ist ein ungewöhnlicher Blick auf die Quantenmechanik.

#### **Können Sie die Qubits trotz ihrer Größe auch miteinander verschränken, also quantenmechanisch koppeln?**

Dazu müssen wir die Frequenz verstellen, mit der die Ladungen hin und her schwingen, indem wir ein Magnetfeld ändern. So führen wir mehrere Qubits in eine Resonanz. In diesem Zustand gibt es eine Kopplung zwischen den Ladungen verschiedener Einheiten, und diese Interaktion führt zur Verschränkung. Auf diese Weise bauen wir auch die logischen Gatter zwischen den Qubits auf.

#### **Mit diesen Bauteilen lassen sich einfache Rechenoperationen durchführen. Beispielsweise gibt ein UND-Gatter Auskunft, ob zwei Bits beide den Binärwert 1 haben. Welche logischen Operationen können Sie auf Ihrem Quantencomputer bereits implementieren?**

Ein einzelnes Qubit ist bereits eine Art Nicht-Gatter. Genauer gesagt ist es etwas, das ich Wurzel-aus-Nicht-Gatter

nenne, weil man zwei Qubits hintereinander braucht, um ein Nicht (NOT) zu erzeugen. Und verschränkte Gatter bilden eine Art exklusives Oder (XOR).

**In den vergangenen Jahren haben Sie die Qubit-Zahl immer wieder ungefähr verdoppelt. Von 4 auf 9, 22 und jetzt 49 Qubits. Bei 50 liegt aus Sicht vieler Quantenphysiker eine symbolische Schwelle. Was ist an dieser Zahl so besonders?**

Wir erwarten, dass wir mit dem Quantencomputer dann seine prinzipielle Überlegenheit beweisen können, die so genannte Quantum Supremacy. Den Begriff hat John Preskill vom California Institute of Technology geprägt. Wir meinen damit eine Aufgabe, die ein Quantencomputer sehr schnell absolviert, also in Sekunden, während der beste Supercomputer der Welt Stunden oder Tage braucht. Bei ungefähr 50 Qubits ist vermutlich der Punkt erreicht, an dem der klassische Rechner die Aufgabe gerade noch ausführen kann. Das ist wichtig, denn wir müssen das Ergebnis des Quantencomputers ja überprüfen können.

**Ihr Kollege Scott Aaronson von der University of Texas in Austin hat die Aufgabe so beschrieben: Quantencomputer müssen so hoch wie möglich auf einen Berg steigen, aber vom Tal aus – für gewöhnliche Rechner – noch zu sehen sein. Mit was für einer Aufgabe versuchen Sie das?**

Der Computer baut und benutzt einen zufällig aufgebauten logischen Kreislauf. Das erfüllt keinen Zweck in der realen Welt, außer dass es ein gewaltiger Systemtest für den Quantencomputer ist und für eine Feineinstellung genutzt werden kann. Die Frage ist: Funktioniert alles so wie geplant? Auch für den Quantenrechner ist der Test kompliziert und es kann viel schiefgehen.

**Was bedeutet das, einen zufälligen logischen Schaltkreis aufzubauen?**

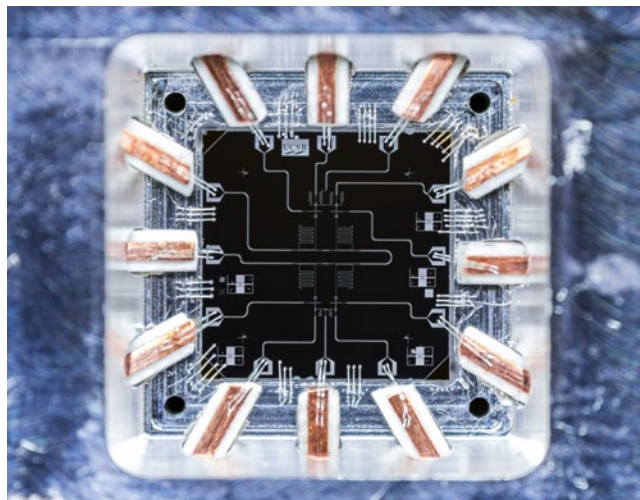
Der Computer schaltet zufällig ausgewählte logische Gatter aus NOT und XOR zusammen und berechnet das Ergebnis.

**Klingt nicht sonderlich kompliziert.**

Zunächst einmal hat dieser Schaltkreis eine Struktur, wie sie sich später bei jedem Algorithmus ergäbe, es ist also ein allgemeiner Test. Und dabei spielen Quantencomputer ihre ganzen Vorteile aus. Ein klassischer Computer muss alle möglichen Gatter-Variationen nacheinander prüfen. Je mehr Qubits zur Verfügung stehen, desto aufwändiger wird das. In einem Quantencomputer wird die Aufgabe hingegen von allen Qubits gleichzeitig gelöst und so steigt die Rechenkraft exponentiell an, also wie  $2^{49}$ .

**Wenn Sie nur ein weiteres Qubit dazugeben, haben Sie doppelt so viel und mit zehn Qubits mehr ungefähr 1000-mal so viel Power? Was den Supercomputer bei 50 Qubits Tage kostet, sind bei 60 schon Jahre?**

Ja, aber es ist nicht unbedingt die Rechengeschwindigkeit, bei der der Supercomputer zurückbleibt, sondern vor



Ein Prototyp des von Martinis verwendeten Xmon-Qubits aus dem Jahr 2014: Die Schaltkreise des Chips sind besonders gut gegen elektromagnetische Störsignale abgeschirmt.

allem die Speicherkapazität. All diese Daten im Arbeitsspeicher zu behalten und schnell genug hin- und herzuschicken, das bereitet einer klassischen Maschine große Probleme.

**Ihre Konkurrenten bei IBM schreiben allerdings, so groß seien die Probleme bei 49 Qubits gar nicht, wenn man diese auf einem klassischen Rechner mit dem richtigen Algorithmus simuliert. Dauert es also doch noch etwas länger bis der Quantencomputer klassischen Maschinen wirklich davoneilt?**

Die Physik besagt, dass man andere Berechnungsalgorithmen verwenden kann, wenn die Tiefe des Schaltkreises – die Zahl der Operationen, die nacheinander ausgeführt werden können – gering ist. Über diese Möglichkeit haben wir auch schon in einem unserer Fachaufsätze berichtet. Was IBM da erklärt, wussten wir und die ganze Forschungsszene also bereits. Wir haben die Ergebnisse für einen Algorithmus angegeben, der eine ausreichend große Tiefe hat, um unsere Behauptungen zu rechtfertigen. Ich denke, die Kollegen sollten unser Paper sorgfältig lesen.

**Die Forscher bei IBM sagen übrigens auch, sie seien Ihnen mit einem 50-Qubit-Quantencomputer zuvor gekommen, allerdings ohne viele Einzelheiten zu verraten.**

Die Qualität der Qubits ist mindestens so wichtig wie die Quantität. Unsere haben eine Fehlerrate von etwa 0,5 Prozent. Wir können im Prinzip 200 logische Operationen hintereinander ausführen, bevor die Qubits ihre Kohärenz verlieren, also den Zustand nicht mehr halten können und man neu anfangen muss. IBM hat bei einem früheren Chip eine Fehlerrate von fünf Prozent angegeben, sie müssen also nach 20 Operationen jeweils neu anfangen. Mal sehen, ob sie sich jetzt verbessert haben. Ich sehe jedenfalls den Zeitplan zu unserem Supremacy-Experiment nicht gefährdet.



**Dieser Versuch mit den zufälligen Schaltkreisen mag ja ein notwendiger Test sein, aber es klingt trotzdem ein wenig enttäuschend. Mit Quantencomputern assoziiert man doch eigentlich Algorithmen wie den von Peter Shor, mit dem sich große Zahlen enorm schnell in ihre Primfaktoren zerlegen lassen. Ist der anstehende Test nicht vor allem l'art pour l'art?**

Es ist Grundlagenforschung, die sich langfristig als sinnvoll erweisen wird. Wir müssen doch nachweisen, dass die Rechenleistung exponentiell ansteigt. Und wir zeigen damit auch, dass Quantencomputer nicht mehr nur diese abstrakte Idee von Physikern sind, sondern dass sie ihre Kraft machtvoll beweisen können. Es wird gerade in der Informatik viele Menschen dazu bringen, ihre Energie in dieses Feld zu investieren. Wir machen erst einmal etwas Eindrucksvolles, dann etwas Sinnvolles.

#### **Was schwebt Ihnen konkret vor?**

Wir machen unsere Experimente bei Google im so genannten Quantenlabor für künstliche Intelligenz. Da schauen sich meine Kollegen schon an, was der Quantencomputer für maschinelles Lernen bedeutet. Dabei handelt es sich letztlich um eine Art Optimierungsproblem, und das können Quantenrechner vermutlich gut bewältigen.

#### **Was noch?**

Die Quantenchemie sieht viel versprechend aus. Es geht darum, die Energieniveaus und Reaktionsraten von Molekülen zu berechnen. Das hatte schon Richard Feynman in den 1980er Jahren angeregt. Von ihm habe ich damals das erste Mal etwas über Quantencomputer gehört.

#### **Was hatte Feynman damals im Sinn?**

Man benutzt ein Quantensystem, also den Rechner, um ein anderes, nämlich das Molekül, zu simulieren und zu berechnen. Heute werden Supercomputer dafür eingesetzt, solche Ergebnisse zu bestimmen. 20 bis 30 Prozent ihrer Zeit werden dafür verbraucht. Und es ist gerade der exponentiell anwachsende Speicherplatz, der solche Kalkulationen so schwierig macht. Quantencomputer könnten das Problem viel effizienter lösen.

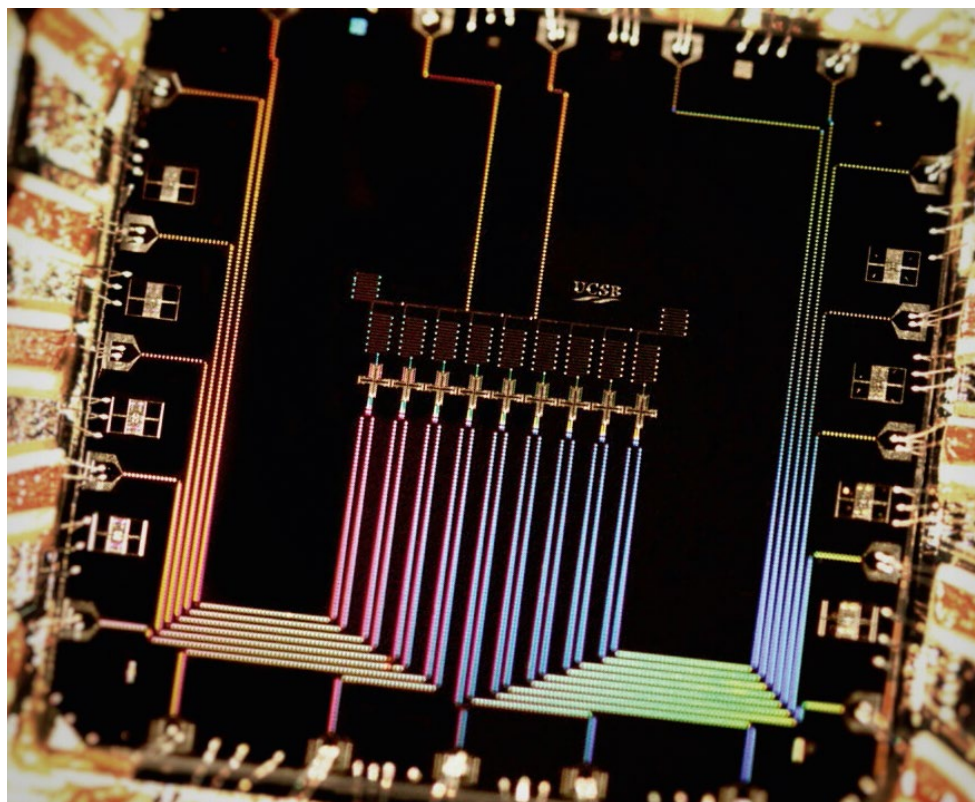
#### **Die Faltung und das Bindungsverhalten großer Biomoleküle machen den Spezialisten heute in der Tat viele Schwierigkeiten.**

Ja, das fängt schon bei Molekülen aus 20 Atomen an. Der Quantencomputer könnte sich also einem Problem zuwenden, das bereits viele Menschen beschäftigt. Es haben sich auch schon etliche Spezialisten daran gemacht, entsprechende Algorithmen für den Quantencomputer zu entwickeln. Die letzten paar Probleme haben wir bei Google in den vergangenen Jahren beseitigt. Darum denken wir, dass wir das nötige Rüstzeug haben, um die Hardware richtig benutzen zu können.

#### **Womit man Quantencomputer sonst immer verbindet, sind die Warnungen, sie könnten die Verschlüsselung im Internet knacken.**

Ach, daran sind wir gar nicht interessiert. Wie Sie schon sagten, geht es dabei im Kern darum, mit Hilfe des Shor-Algorithmus die Primzahlteiler von großen Zahlen zu finden, also um eine Faktorisierung. Das ist für herkömmliche Rechner ziemlich schwierig oder genauer gesagt

Eine neuere Variante des Quantencomputers von John Martinis besteht aus neun nebeneinander angeordneten, supraleitenden Qubits: In den 0,5 Millimeter großen, auf 20 Millikelvin abgekühlten Kreuzen bewegen sich Elektronen, deren kollektive Bewegungsrichtung den Werten 0 beziehungsweise 1 entspricht. Leitungen unterhalb der Kreuze dienen dazu, die Qubits mit Mikrowellenpulsen anzusteuern. Oben sind sie mit Resonatoren verbunden, über welche die Zustände ausgelesen werden.



bisher unmöglich, weshalb das im Internet weit verbreitete RSA-Verschlüsselungssystem darauf basiert. Aber Informatiker haben auch schon andere Verschlüsselungstechnik entwickelt, die resistent gegen Angriffe von Quantencomputern ist.

**Das alles müssten Sie aber auch sagen, wenn Sie die Primzahlzerlegung schon hinbekommen hätten, Ihren Vorteil aber noch lange geheim halten wollen. Interessiert Sie das mit der Verschlüsselung wirklich nicht?**

Ich arbeite lieber an Fragestellungen, die eine wichtige Bedeutung für die Gesellschaft haben.

**Wie groß müsste ein Quantencomputer denn sein, um die für die RSA-Entschlüsselung nötige Faktorisierung zu bewältigen?**

Er bräuchte vermutlich 300 Millionen Qubits. Vor allem für die Korrektur von Fehlern. Sehen Sie, mit 100 Qubits könnte man in der Quantenchemie schon etwas anfangen. Aber auch da braucht man eine Million Qubits, wenn man alle Fehler ausbügeln will.

**100 Qubits machen die Arbeit und der Rest kontrolliert alles?**

So ist es. Darum ist es ja so ein großes Problem. Wir sind in dieser Hinsicht von klassischen Computern verwöhnt. Im Quantencomputer macht jedes einzelne Qubit zwar nur wenige Fehler, aber es macht eben welche. Und wenn man die Fehlerrate auf eins zu einer Billion oder Billiarde drücken will, braucht man viele zusätzliche Qubits.

**Die Kraft des Quantencomputers besteht darin, Superpositionen von möglichen Zuständen zu bewahren und zu verarbeiten. Aber wenn Sie am Ende des Prozesses das Ergebnis haben möchten, müssen Sie die Qubits zwingen, sich zu entscheiden. Im Jargon der Physiker: Die Wellenfunktion kollabiert. Um Fehler festzustellen, die Sie dann korrigieren wollen, müssen Sie das aber auch tun. Stört das nicht die Rechnung?**

Deswegen brauchen wir so viele Qubits für die Fehlerkorrektur. Diese liegen sozusagen am Rand, und wir können sie auslesen und daraus darauf schließen, was im Kern passiert, ohne dort direkt einzugreifen und so die Rechnung zu stören. Aber wir arbeiten auch an Ideen, wie wir eine Million Qubits zusammenbauen sollten. Zunächst überlegen wir uns, wie wir Algorithmen entwickeln, die gegenüber Fehlern tolerant sind und was wir schon mit Geräten anfangen können, in denen Fehler nicht vollständig korrigiert werden.

**Was nützt eine Berechnung, von der Sie annehmen müssen, dass sie Fehler enthält, aber Sie wissen nicht, wo sie sind?**

Lassen Sie mich dazu ein Beispiel nennen. Wir haben vor zwei Jahren den einfachen Versuch gemacht, die Energieniveaus des Wasserstoffmoleküls zu berechnen; es war eine Kalkulation mit Fehlern. Das Verfahren zur Auswertung aber, ein so genannter Variational Quantum Eigensolver, war nicht besonders anfällig für Fehler und so konnten

wir die Energieniveaus bis zu jener chemischen Präzision berechnen, die man braucht, um realistische Vorhersagen über die Reaktionsraten zu machen.

**Soll also in Zukunft die Software die Fehlerkorrektur übernehmen, nicht die Hardware?**

Ich denke es wird eine Kombination aus beidem sein. Das ist ein offenes Feld für die Forschung, aber es wäre wichtig, in Zukunft auch die Fehlerrate der Qubits selbst senken und die Fehlerkorrektur auf dieser Ebene verbessern zu können.

**Ihr Arbeitgeber Google will demnächst einen Zugriff auf den Quantencomputer über die Cloud anbieten. Heißt das, dass ich dann meine Berechnungen auf Ihrem Gerät machen lassen kann?**

Das ist der Plan. Sie können sich um Rechenzeit bewerben und Qubit-Algorithmen ablaufen lassen. Wir bereiten die Schaltkreise und die Kompilierung vor, also die Übersetzung der Instruktionen bis auf die Maschinenebene. Nutzer aus der Industrie müssen vermutlich für den Zugriff etwas bezahlen. Die Firmen D-Wave und IBM machen das ja schon sehr erfolgreich, aber bei uns soll der Supremacy-Chip über die Cloud erreichbar sein. Es geht schließlich um einen Quantencomputer, den Sie nicht auf Ihrem Laptop simulieren könnten.

**War es gut, dass sich Firmen wie Google so auf dieses Feld gestürzt haben? Ein bisschen erinnert mich die Lage an die Situation im Jahr 2000, als das menschliche Genom entziffert wurde. Daran hatten öffentlich finanzierte Forscher lange gearbeitet. Dann kamen Craig Venter und seine Firma Celera Genomics – und plötzlich ging es ganz schnell.**

Ich arbeite ja seit drei Jahren neben meiner Forschungsgruppe an der University of California für Google. Zum Glück sind die Labore in Santa Barbara. Mein Team ist jetzt nicht viel größer, aber wir können fokussierter arbeiten und uns schneller bewegen. Wir haben zum Beispiel zwei Jahre damit verbracht, die Technologie so auszulagern, dass wir schnell die Zahl der Qubits erhöhen können. Das ist in der Industrie einfacher. Aber wir müssen natürlich immer noch beweisen, dass unsere Ideen funktionieren.

**Kann Europa in Sachen Quantenkommunikation noch mithalten? Hier gibt es keinen Internetgiganten wie Google, der massiv in die Technologie investiert.**

Es gibt da interessante kulturelle Unterschiede. Die Ideen und Konzepte der europäischen Forschung haben viel mit Einstein zu tun, seiner »spukhaften Fernwirkung«, also der Verschränkung, und mit solchen Forschern wie John Bell und Anton Zeilinger. Die Amerikaner sind viel mehr von Richard Feynmann inspiriert, der gesagt hat: Lasst uns einen Quantencomputer bauen, um damit Probleme zu lösen. ◀

Die Fragen stellte **Christopher Schrader**, Physiker und Wissenschaftsjournalist in Hamburg.



**NEU!**

# Spektrum PLUS<sup>+</sup>

DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

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

## AKTUELLE ANGEBOTE UND TERMINE

- Download des Monats im Februar:  
**Spektrum** KOMPAKT »Insekten«
- Redaktionsbesuch bei **Spektrum** der Wissenschaft am 21. März 2018
- Leser-Exkursionen zum DESY am 6. April 2018 und zum Radioteleskop Effelsberg am 9. Juni 2018
- Veranstaltungen der neuen Reihe **Spektrum** LIVE zum Vorteilspreis

Weitere Informationen und Anmeldung:

**Spektrum.de/plus**

# ASTRONOMIE EIN ANTIKES GROSS- FORSCHUNGSPROJEKT

**SERIE: BABYLON** Mesopotamische Gelehrte beobachteten systematisch die Phänomene des Nachthimmels, hinterlegten über Jahrhunderte hinweg die Vorgänge in Archiven und entwickelten sogar mathematische Algorithmen, um sie zu modellieren.



Der Philosoph **Gerd Graßhoff** (links) und der Altorientalist **Mathieu Ossendrijver** lehren Geschichte antiker Wissenschaften an der Humboldt-Universität zu Berlin. Die Entwicklung der babylonischen Astronomie ist für beide ein Forschungsschwerpunkt.

» [spektrum.de/artikel/1522033](http://spektrum.de/artikel/1522033)

► Astronomie ist heutzutage eine Wissenschaft der Superlative: Mit vielen Millionen Euro teuren Teleskopen durchmustern Forscher den Kosmos in allen Spektralbereichen. Ihren Daten nach gibt es mehr als eine Billion Galaxien mit unzähligen Sonnen. Um noch die schwächsten Lichtspuren zu erfassen, beobachten sie den Himmel von Wüsten und Bergen aus, weit vom Streulicht der Städte und Industrielandschaften entfernt. Nur wenigen Astronomen ist bewusst, dass sie in einer Tradition stehen, die älter ist als die Erfindung der Schrift – und die bereits im 1. Jahrtausend v. Chr. ein Großforschungsprojekt beinhaltet.

Unseren Vorfahren bot sich vor Jahrtausenden ein grandioser Nachthimmel: Ohne die heutige Lichtverschmutzung waren mehr als 5000 Sterne und eine funkelnde Milchstraße mit bloßem Auge sichtbar. Allenfalls Wolken oder Dunst trübten den Blick, und während der Dämmerungsphasen überstrahlte die unter dem Horizont stehende Sonne lichtschwächere Gestirne. Dabei vollzogen Sonne, Mond, Planeten und Sterne einen wunderbaren Reigen: Sie gingen im Osten auf und im Westen wieder unter, wobei der genaue Verlauf ihrer Bahnen im Lauf des Jahrs variierte.

Mesopotamische Gelehrte versuchten als Erste, Zusammenhänge zwischen den Gestirnen und Ereignissen auf der Erde durch systematische Beobachtung über Generationen hinweg zu erkennen. Indem sie Regeln formulierten, ihre Daten mit anderen Experten diskutierten und in Archiven überlieferten, legten sie die Grundlagen jedweder Wissenschaft.

## SERIE

### Babylonische Wissenschaft

Teil 1: Januar 2018

#### Größe hat ihren Preis

Hagan Brunke und Eva Crancik-Kirschbaum

Teil 2: Februar 2018

#### Ein antikes Großforschungsprojekt

Gerd Graßhoff und Matthieu Ossendrijver

Teil 3: März 2018

#### Mit dem Herzen denken

Markham Geller

Unter allen astronomischen Phänomenen wählten diese frühen Astronomen nur solche aus, denen sie eine praktische Bedeutung beimaßen. Dazu gehörten insbesondere Mond- und Sonnenfinsternisse sowie die Bahnen der Gestirne auf der Himmelskuppel. Heutzutage wissen wir: Die Erde kreist um die Sonne und dreht sich dabei um die eigene Achse; der Mond umrundet zudem die Erde. Dem Beobachter in der Antike hingegen erschien jede Konstellation als Ergebnis von Bewegungen am Himmel.

All dies rhythmisierte die Lebenswelt alter Kulturen. Mit der Morgendämmerung begann der Tag mit seinen vielen Aktivitäten, die das Überleben sicherten, mit dem Sonnenuntergang endete er. Der Neumond markierte in vielen alten Kulturen den Beginn eines neuen Monats. Er findet sich auch auf der so genannten Himmelscheibe von Nebra





Mondfinsternisse galten im Alten Orient als bedeutende Vorzeichen. Welche Ereignisse sie ankündigten, versuchten die Gelehrten anhand von Begleitphänomenen zu ergründen und in Regeln zu formulieren. Die Tafel, von der dieses Fragment stammt, gehörte zu der als »Als die Götter Anu und Enlil« bezeichneten Omenserie, die in der Bibliothek des neuassyrischen Königs Assurbanipal archiviert war. Zum Beispiel lautete eine der Regeln: »Wenn im 7. Monat an Tag 20 eine (Mond-)Finsternis stattfindet, und sie ist gegenüber der Sonne: Zerstörung des Landes.«



(siehe Bild rechts). Die späten Kelten richteten die Hügelgräber wichtiger Anführer nach den Großen Mondwenden aus, das heißt nach dem äußersten südlichen und nördlichen Aufgangspunkt des Monds (siehe »Heiliger Mond«, **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 3/2013, S. 22).

### Der Siriusaufgang kündigte die Nilflut an

Von enormer Bedeutung waren freilich die Jahreszeiten, die der Umlauf der Erde um die Sonne mit sich bringt, denn das Wohlergehen einer Gemeinschaft hing wesentlich am Erfolg der Landwirtschaft. Wer die Saat zu spät oder zu früh ausbrachte, dem drohten Missernten und Hunger. Die Bauern des Neolithikums wussten, dass der genaue Aufgangspunkt der Sonne am Horizont über das Jahr hinweg von Süden im Winter, nach Norden im Sommer wandert. Im Frühling, wenn die Saat ausgebracht werden musste, lag er genau im Osten.

Den jahreszeitlichen Kalender orientierte man auch an den ersten und letzten Sichtbarkeiten einiger Fixsterne, also solcher Lichtquellen, die zueinander anscheinend unveränderte Abstände wahren und sich im Zuge der Nacht von Osten nach Westen auf einer immer gleichen Bahn bewegten. Selbst helle Sterne stehen im Jahreslauf für einige Wochen in der Nähe der Sonne, werden von ihr überstrahlt und sind damit unsichtbar. An einem bestimmten Tag aber hat sich die Sonne ausreichend weiterbewegt, und der Stern blinkt kurz vor Sonnenaufgang erstmals wieder auf. Für einen Ägypter zeigte ein solcher »heliakischer Aufgang« des Sirius im Sommer verlässlich die kommende Flut des Nils an, die die Felder tränkte und fruchtbaren Schlamm hinterließ. Jener der Plejaden, eines auffälligen Sternhaufens unserer Galaxis, diente unter anderem den Griechen als Zeichen für den Frühlingsanfang und damit laut dem Geografen Herodot ebenfalls als Signal für die Aussaat.

Da es noch keine Schrift gab, wissen wir nicht, wie solche Kenntnisse in den Dörfern der Jungsteinzeit formuliert und weitergegeben worden sind. Erst um 3300 v. Chr. kam

LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE UND ARCHÄOLOGIE SACHSEN-ANHALT / JURAJ LIPTRAK

im Zwei-stromland die Keilschrift auf. Sie diente zunächst Wirtschaft und Handel: In Ton eingedrückte Zeichen fixierten Kaufverträge und Buchhaltungslisten (siehe »Wissen für die Elite«, **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 3/2014, S. 6). Bald aber erkannten Gelehrte, dass sich auf diese Weise auch Wissen archivieren ließ.

Für Astronomen bot das erhebliche Vorteile: Sie konnten interessante Ereignisse unabhängig von deren Zeitpunkten und Orten miteinander vergleichen. Ihre Analysen verlängerten sich nun weit über das hinaus, was das Gedächtnis eines Einzelnen zu speichern vermochte. Hatte sich beispielsweise eine Finsternis schon einmal oder gar mehrmals zugetragen? Dann war sie vielleicht auch an ganz anderen Orten registriert worden, und es fanden sich entsprechende Eintragungen in den Archiven. Generationen von Beobachtern füllten diese mit Daten. Auf diese

## AUF EINEN BLICK SONNE, MOND UND STERNE

- 1 Um den Willen der Götter zu erkunden, beobachteten Generationen mesopotamischer Gelehrter über Jahrhunderte den Himmel und notierten das Gesehene auf Keilschrifttafeln.
- 2 Formale Regeln halfen, die Beobachtungen als Omen zu deuten. Die Daten erlaubten aber auch präzise Vorhersagen etwa der Planetenbewegungen.
- 3 Dazu entwickelten die babylonischen Gelehrten mathematische Verfahren, die Astronomen noch jahrtausendlang verwendeten.







LANDSCHAFT FÜR DENKMALPFLEGE UND ARCHÄOLOGIE SACHSEN-ANHALT / JURAJ LIPTAK

Die etwa 4000 Jahre alte Himmelscheibe von Nebra bildete vermutlich astronomisches Wissen der Bronzezeit ab. Unter anderem zeigt sie den jungen Mond zu Monatsbeginn. Die Vollscheibe könnte den regelmäßig verfinsterten Vollmond symbolisieren. Die Bögen an den Seiten repräsentieren wohl Auf- und Untergangspunkte der Sonne am Ost- und Westhorizont.

Diese reiche Überlieferung ist nicht allein für Astronomiehistoriker interessant, sondern auch für Philosophen, die sich mit den theoretischen Aspekten von Wissenschaft und ihrer Entwicklung befassen. Charakteristisch ist, dass Forscher allgemeine Hypothesen über regelmäßig auftretende Zusammenhänge zwischen Phänomenen aufstellen. In der modernen Physik etwa sind das oft komplexe mathematische Gleichungen. Die älteste Art der Formulierung aber, wie man sie in den Keilschriften findet, lautet schlicht: »Nachdem ein Zeichen X aufgetreten ist, geschieht ein Ereignis vom Typ Y.« Nach mesopotamischer Vorstellung war prinzipiell die gesamte Natur durch Zeichen (X) repräsentiert, die es zu interpretieren galt, um daraus Vorhersagen zu irdischen Ereignissen (Y) abzuleiten.

Jenen Gelehrten war offenbar klar, dass weder X noch Y zufällig auftraten. Sie verstanden zudem, dass der Zusammenhang indirekt hergestellt wurde. X war also keineswegs die direkte Ursache für Y, taugte aber dazu, dessen Auftreten anzuzeigen. Sie sahen in dieser Verbindung das Wirken göttlicher Mächte und unterstellten natürliche Gesetzmäßigkeiten an Stelle des Zufalls.

Diese Art der Formulierung und Überlieferung von Hypothesen durch so genannte Zeichenklauseln verbreitete sich schnell in vielen antiken Kulturen. Standard waren sie in allen Textgattungen der »Divination«. Sie beinhalteten die astrologische Deutung von Mondfinsternissen und anderen Himmelsphänomenen wie auch die medizinische Diagnostik. Nicht zu verwechseln sind Zeichenklauseln mit einem logischen Konditional, wie es der Philosoph Karl Popper (1902–1994) für wissenschaftliche Hypothesen vorschlug. Diese Konstruktion folgt dem Schema »Aus Q folgt P«. Das Konditional ist also falsch, wenn Q auftritt, P aber ausbleibt. Bei einer Zeichenklausel hingegen können Ausnahmebedingungen für das Ausbleiben von P verantwortlich gemacht werden. Um den Bestand an Wissen zu prüfen, mussten die babylonischen Gelehrten ihre Regeln daher systematisch anwenden. Solange eine Zeichenklausel den Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines Zeichens und seiner Folge häufig genug feststellte, besaß sie praktischen Wert für Prognosen und Analysen etwa von problematischen Situationen. blieb die vorhergesagte Folge aber zu häufig aus, wurde die Klausel entweder gestrichen oder durch Zusatzbedingungen modifiziert. Außerdem war der gesamte Regelsatz problemlos erweiterbar.

Ohne Archive sowie die Verankerung der Sternenkunde in einem institutionellen Rahmen – die Gelehrten arbeiteten im Auftrag der Herrscher – wäre dergleichen freilich kaum möglich gewesen. Ein berühmtes Beispiel ist die Textsammlung »Enuma Anu Enlil«, zu Deutsch: »Als die Götter Anu und Enlil«, benannt nach ihren Anfangsworten.

Weise erfolgte ein zentraler Schritt auf dem Weg zur Wissenschaft: die Formulierung von allgemeinen Hypothesen durch eine Gemeinschaft von Gelehrten.

Unser Wissen über die babylonische Astronomie basiert auf Tausenden von Keilschrifttafeln, von denen viele zwischen 1872 und 1890 bei Ausgrabungen durch Forschungsreisende und Einheimische in Babylon zu Tage kamen. Weitere wurden dann im 20. Jahrhundert von Archäologen dort sowie in Uruk entdeckt. So findet man eine der ältesten Erwähnungen von Sternbildern im »Gebet an die Götter der Nacht«, einem Text aus Babylon, der um 1700 v. Chr. entstand. Der Hymnus erwähnt die Namen von vier Sterngruppen, darunter wohl der Wagen, drei helle Einzelsterne sowie die Plejaden (siehe »Wiege der Sternbilder« **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 3/2013, S. 6).

Es handelt sich um rund 7000 Omen, die in etwa 70 Tafeln überliefert sind (siehe Bild S. 69). Viele davon gehören inhaltlich zusammen, so dass sich mehrere thematische Gruppen unterscheiden lassen. Zumeist enthalten sie astronomische Zeichenklauseln. Eine Regel verhiess beispielsweise nichts Gutes für König und Staat: »Tritt eine Mondfinsternis auf, stirbt kurz danach der König von Akkad, und sein Sohn wird König.« Es gab aber auch Omen für Alltägliches wie Dürren oder sintflutartige Regenfälle, was etwa für die Planung von Ernten und in der Folge für das Erheben von Steuern relevant war.

Die meisten erhaltenen Tafeln stammen aus der neuassyrischen und spätbabylonischen Zeit (700–100 v. Chr.). Vermutlich entstand die Serie aber schon um etwa 1200 v. Chr. und von einigen Texten existieren sogar altbabylonische Vorläufer (1800–1600 v. Chr.). Ein Großteil gehörte zur Bibliothek des assyrischen Königs Assurbanipal (669–631/627 v. Chr.), und viele wurden noch kopiert, konsultiert und auch modifiziert, als Alexander der Große über Babylon herrschte.

Ab etwa 650 v. Chr. erlebte die frühe Sternenkunde offenbar einen Entwicklungsschub. Zu den Regelwerken

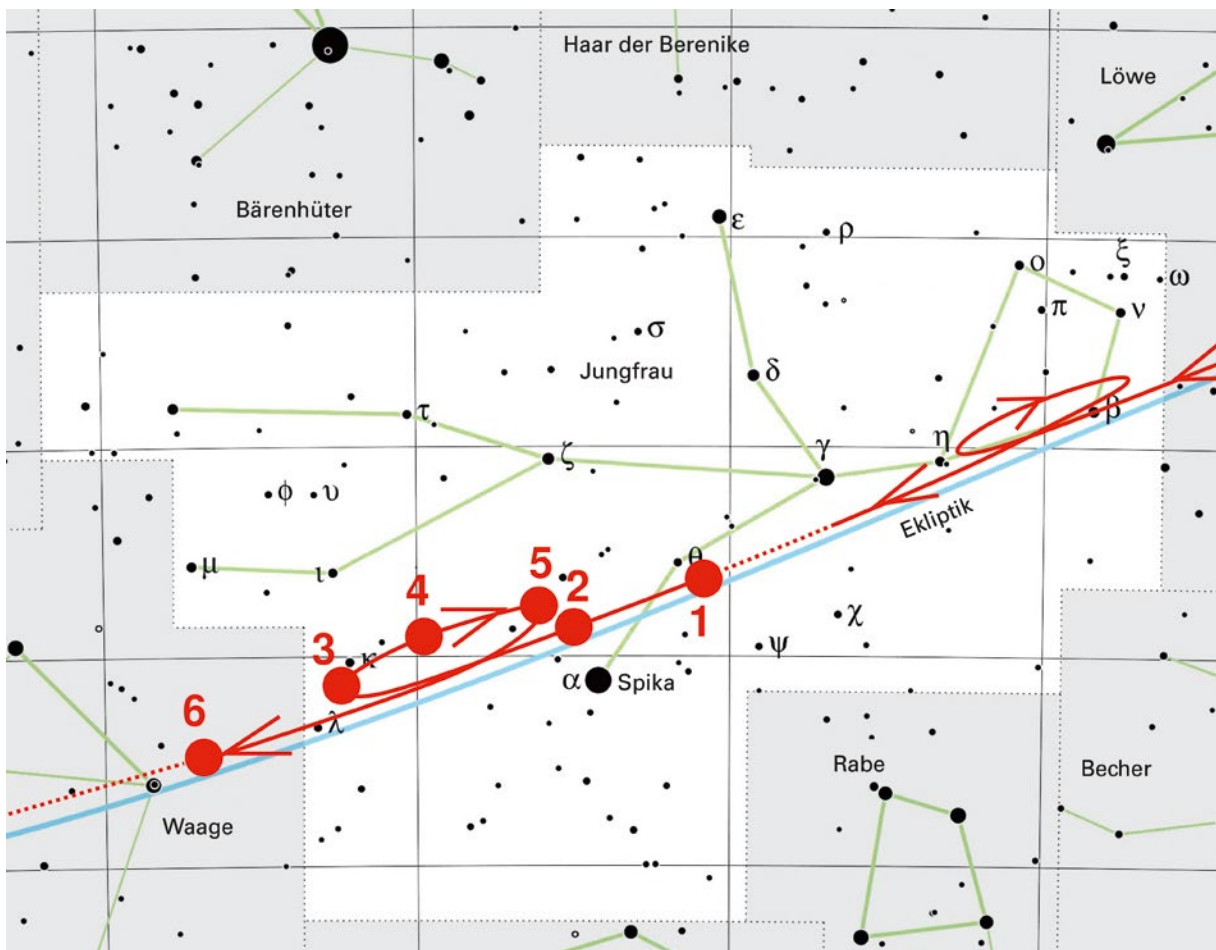
## Die Pfade des »Weißten Sterns«

Babylonischen Beobachtungen nach vollzog Jupiter, genannt »Weißer Stern«, am Nachthimmel einen gut 13 Monate dauernden Zyklus. Dieser begann mit der ersten Sichtbarkeit als Morgenstern (Punkt 1). Der Planet wanderte dann am Nachthimmel vier Monate lang nach links, bis er

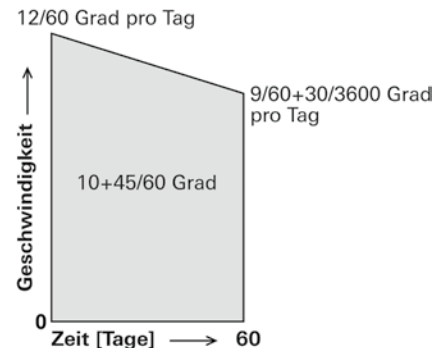
etwa weitere vier Monate später scheinbar zum Stillstand kam (Punkt 3). Anschließend lief er ebenso lange nach rechts über das Firmament (angedeutet durch die Richtungspfeile).

Etwa in der Mitte dieser rückläufigen Schleife (Punkt 4) ging er an einem bestimmten Tag kurz

nach Sonnenuntergang auf. In Punkt 5 verharrte er erneut, um dann wieder in seine ursprüngliche Bewegungsrichtung, also nach links zu wandern. In Punkt 6 war er zum letzten Mal zu erkennen, dann bis zur ersten neuerlichen Sichtbarkeit etwa einen Monat dem bloßen Auge verborgen.







Der Weg, den Jupiter in den ersten 60 Tagen nach Punkt 1 zurücklegte, wurde in späteren Keilschrifttexten wie dem abgebildeten als Fläche einer Trapezfigur berechnet, bei der die Geschwindigkeit der Bewegung in Grad pro Tag auf der senkrechten Achse, die Zeit in Tagen auf der waagrecht abgetragen wurde. Diese geometrische Methode geriet in der Antike aber in Vergessenheit und wurde erst in der Neuzeit wieder entwickelt.

kamen reine Sammlungen astronomischer Daten in Form von astronomische Tagebüchern hinzu. Diese und ähnliche Texte belegen, dass der Himmel intensiver und systematischer beobachtet wurde. Die Assyriologen Abraham Sachs von der Brown University in Providence und Hermann Hunger von der Universität Wien haben die Tafeln ediert, das heißt sie buchstabengetreu in unsere Schrift übertragen und übersetzt, somit Forschern weltweit zugänglich gemacht.

Insbesondere in der Metropole Babylon waren, so vertragen es Namen und Verwaltungslisten, in denen beispielsweise die Verpflegung von Astronomen aufgeführt wird, etwa 15 Gelehrte hauptsächlich mit der Himmelsbeobachtung betraut. Die Texte enthalten detaillierte Aufzeichnungen über den Mond und die Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn, aber auch über das Wetter, den Pegel des Euphrats, den Marktpreis von Getreide und anderen Lebensmitteln sowie über lokale Ereignisse. Die Aufzeichnungen wurden in fast unveränderter Form über sieben Jahrhunderte bis ins 1. Jahrhundert n. Chr. fortgesetzt.

Ein derartiges Observierungsprogramm hatte es nie zuvor gegeben. Dank der standardisierten Informationen verfügten die Astronomen des Zweistromlands über eine umfangreiche empirische Datenbasis zur Vorhersage von Himmelsphänomenen. Es gibt zwar Hinweise, dass auf dieser Grundlage auch neue Omen etwa zur Prognose von Wetter und Marktpreisen konstruiert wurden, im Wesentlichen aber blieb es bei den schon vorhandenen Zeichenklauseln. Entweder galten sie als für alle praktischen

Fragen ausreichend und korrekt oder der Erkenntnisgewinn hatte bereits einen eigenen Stellenwert in der mesopotamischen Gesellschaft, was eine systematische Datenerhebung auch ohne Prognoseabsicht rechtfertigte.

Im Rahmen des Exzellenzclusters Topoi wurde die Edition dieser Tagebücher in Zusammenarbeit mit Hermann Hunger und dem Physiker Gordon Fischer für eine digitale Version überarbeitet, die sich inzwischen via Internet abrufen lässt, beispielsweise um die beschriebenen Beobachtungen mit moderner astronomischer Software zu überprüfen (<http://repository.edition-topoi.org/collection/BDIA>).

### Der frühe Beginn der geometrischen Astronomie

Zum Beispiel beschrieb man eine Passage des Mondes nahe einem hellen Stern. Die babylonischen Astronomen bestimmten die astronomischen Distanzen zwischen Mond und Gestirn kurz vor Aufgang der Sonne. Der Abgleich mit modernen Berechnungen zeigte, dass sie dabei das ekliptikale Koordinatensystem verwendeten. Ihre Angaben bezogen sich also auf die von der Sonnenbewegung am Himmel aufgespannte Ebene. Das aber bedeutet, dass bereits die Babylonier, nicht erst die Griechen, geometrische Betrachtungen in die Astronomie integrierten.

Anhand der Tagebücher erstellte man auch so genannte Exzerpttafeln, die ausschließlich Beobachtungen einzelner Planeten, dann aber aus mehreren Jahrzehnten enthielten. Ein solches Werk listete beispielsweise Daten zum Pla-

neten Jupiter, »Weißer Stern« genannt, für den Zeitraum 362–323 v. Chr. auf. Das folgende Zitat stammt aus dem zweiten Regierungsjahr Artaxerxes III. (358–357 v. Chr.):

»Monat VI, 29. Tag: erste Sichtbarkeit in der Furche (gemeint ist das Sternbild Jungfrau), Sichtbarkeitsdauer (vom Aufgang Jupiters bis Sonnenaufgang), 14 Zeitgrade (entspricht 56 Minuten)

Monat VIII, Nacht des 3., Ende der Nacht: 1 2/3 Ellen über dem Hellen Stern der Furche (gemeint ist der Stern  $\alpha$  Vir in der Jungfrau, auch bekannt als Spika)

Monat XI, bis zum 1. Tag, stationär im Osten in der Waage; nicht beobachtet

Monat XII, 27. Tag, Aufgang (zum) Sonnenuntergang.«

Auch für das dritte Regierungsjahr enthielt das Exzerpt entsprechende Angaben, so dass wir heute einen Jupiterzyklus von der ersten Sichtbarkeit als Morgenstern bis zur nächsten etwa 13 Monate später rekonstruieren können (siehe »Die Pfade des ›Weißen Sterns‹«, S. 72). Demnach beobachteten die babylonischen Astronomen eine Bewegung des Planeten über den Nachthimmel, die nach gut vier Monaten scheinbar zum Stillstand kam, anschließend für dieselbe Zeit in Gegenrichtung lief, wieder anhielt und dann vier Monate lang abermals in die ursprüngliche Richtung erfolgte, bis Jupiter zum letzten Mal sichtbar war und für etwa einen Monat verschwunden blieb.

Anhand solcher Aufzeichnungen erkannten die Astronomen Babylons, dass sich diese Phänomene nach elf

Zyklen, also nach zwölf Jahren, beziehungsweise mit noch genauerer Rückkehr zur Ausgangsposition, nach 65 Zyklen entsprechend 71 Jahren etwa am gleichen Kalenderdatum und an der gleichen Position relativ zu den Fixsternen wiederholen. Diese Erkenntnis inspirierte im 7. Jahrhundert v. Chr. zu dem heute als Zieljahrmethode bezeichneten Verfahren, Kalenderdaten und Positionen von Gestirnen vorherzusagen: Man nimmt einfach die passenden Beobachtungen von 71 Jahren vor dem Zieljahr. Diese Technik wurde wohl schon bei der Jupiter-Exzerpttafel eingesetzt, erklärt das Zitat doch am Ende, dass die betreffende Position »nicht beobachtet« worden sei – man kopierte sie vermutlich aus einem früheren Zyklus. Ab etwa 600 v. Chr. konnten die Gelehrten auf diese Weise fast alle interessierenden astronomischen Phänomene bearbeiten. Moderne Berechnungen bestätigen die Genauigkeit ihrer Prognosen.

### Die Mathematik hält Einzug in die Astronomie

Das Zitat erwähnt auch die Abstände von Jupiter zu nahen Referenzsternen, gemessen in Ellen. Andere Daten der Tafel sind in der Einheit Finger angegeben, wobei eine Elle aus 24 Fingern besteht. Heutige Analysen haben gezeigt, dass eine Elle einem Winkelmaß von etwa 2,2 Grad entspricht. Sie ergaben auch, dass Abstände zu einem Stern, die mit östlich oder westlich angegeben waren, parallel zur Ekliptik bestimmt wurden, jene über oder unter dem Bezugspunkt hingegen senkrecht dazu. Zur Messung dienten wahrscheinlich sehr einfache Instrumente, über deren Aussehen und Funktionsweise leider keinerlei Informationen überliefert sind.

Anfang des 5. Jahrhunderts v. Chr. erreichte die babylonische Astronomie ihre höchste Blüte: Die Gelehrten unterteilten die Ekliptik in zwölf Abschnitte von jeweils 30 Grad und benannten jeden nach einer Sternkonstellation – sie erfanden den Tierkreis. Nun ließ sich die Position eines Planeten oder des Mondes durch eines dieser Zeichen und zwei Messungen definieren: die Distanz zum Anfang des Zeichens sowie – wie schon zuvor – den Abstand des Objekts zur Ekliptik, ergänzt um die Angabe, ob es über oder unter dieser lag.

Innerhalb weniger Jahrzehnte entstanden nun ausgefeilte Rechenverfahren zur Vorhersage von Himmelsphänomenen, wie überlieferte Tabellen und Instruktionen belegen. Dabei benutzten die Gelehrten ein Zahlensystem, das auf der Grundzahl 60 basierte. Noch heute findet diese altorientalische Notation in der Zeit- und Winkelmessung Anwendung. Nach wie vor ging es darum, Prognosen für solche Phänomene wie die erste und letzte Sichtbarkeit von Planeten und ihre Stationen am Firmament verlässlich zu treffen. Gegenüber der Zieljahrmethode hatten die neuen Techniken den Vorteil, ausgehend von einer einzelnen Beobachtung fast beliebig lange Sequenzen von Prognosen zu liefern. Das beruhte vor allem auf noch genaueren Kenntnissen über die relevanten Zyklen. So lag den meisten Jupiteralgorithmen eine Periode von insgesamt 642 Jahren zu Grunde statt den 71 Jahren der Zieljahrmethode.



Claudius Ptolemäus (um 100–160) berechnete scheinbar rückläufige Planetenbahnen auf Grundlage babylonischer Daten (hier ein Holzschnitt aus dem 16. Jahrhundert).



Ab dem 4. Jahrhundert v. Chr. gelang es sogar, die Bewegung eines Planeten oder des Mondes von Tag zu Tag zu berechnen. Während Historiker lange davon ausgingen, dass die Gelehrten dabei nur arithmetisch, das heißt anhand von Zahlensequenzen operierten, belegen vier 2016 von einem von uns (Ossendrijver) untersuchte Tontafeln aus den Jahren 350–50 v. Chr., dass sie mitunter auch geometrische Verfahren einsetzten. Darauf wurde der Abstand, den Jupiter in den 60 Tagen nach seiner ersten Sichtbarkeit zurücklegt, als Trapezfläche ermittelt (siehe Bild S. 73). Die Figur beschrieb, ähnlich wie in einer modernen Funktionskurve, wie die Geschwindigkeit des Planeten im Lauf der Zeit stetig abnimmt. Dieses Verfahren ist für die Antike einzigartig, denn dergleichen galt bisher als eine Erfindung europäischer Mathematiker aus dem 14. Jahrhundert.

Mit der Zeit verbreitete sich das Wissen der babylonischen Astronomen in die umliegenden Kulturräume. Insbesondere im antiken Griechenland machten Gelehrte wie Platon, Euklid oder Hipparchos regen Gebrauch davon. Grundlegende Parameter der babylonischen Regeln zur Bewegung von Sonne, Mond und Planeten übernahmen die griechischen Astronomen ohne Änderung. Claudius Ptolemäus gelang es ungefähr 140 n. Chr., auch die scheinbar rückläufigen Planetenbewegungen in Modellen abzubilden. Er benutzte dazu Epizykeln, also Kreisbewegungen, die innerhalb größerer Zyklen ablaufen.

Der einzigartige »Mechanismus von Antikythera« des 1. Jahrhunderts v. Chr., der aus einem Schiffswrack geborgen wurde, simulierte solche Epizykeln mit Hilfe von Zahnrädern (siehe »Die Entschlüsselung eines antiken Computers«, **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 3/2013, S. 12) Ptolemäus' Modelle waren so präzise, dass sie in modifizierter Form noch von arabischen und später europäischen Astronomen benutzt wurden. Erst Johannes Kepler ersetzte sie 1609 in seinem Hauptwerk »Astronomia Nova« durch die nach ihm benannten Gesetze, mit denen sich die kosmischen Bahnen der Planeten um die Sonne erstmals berechnen ließen. ◀

#### QUELLEN

**Hunger, H., Sachs, A. (Hg.):** *Astronomical Diaries and Related Texts from Babylonia I: Diaries from 652 B.C. to 262 B.C.* Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien 1988

**Hunger, H., Sachs, A. (Hg.):** *Astronomical Diaries and Related Texts from Babylonia II: Diaries from 261 B.C. to 165 B.C.* Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien 1989

**Hunger, H., Sachs, A. (Hg.):** *Astronomical Diaries and Related Texts from Babylonia III: Diaries from 164 B.C. to 61 B.C.* Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien 1996

**Ossendrijver, M.:** *Ancient Babylonian Astronomers Calculated Jupiter's Position from the Area under a Time-Velocity Graph.* In: *Science* 351, S. 482–484, 2016

**GUTSCHEIN €10,-**  
Spektrum|VERLAG  
im Wasserbuch

- Besuchen Sie den Shop: [www.spektrum.de/shop](http://www.spektrum.de/shop)
- Wählen Sie die gewünschten Produkte in den Warenkorb
- Gehen Sie in den Warenkorb und geben Sie den Gutscheincode im dafür vorgesehenen Feld ein
- Klicken Sie auf »Gutschein einlösen«

Der Wert Ihrer Bestellung wird automatisch um den Wert des Gutscheins reduziert. Übersteigt der Bestellwert das Guthaben, muss die Restbestellung mit einer anderen der angebotenen Zahlungsarten begleichen werden. Sofern Sie den Gutschein nicht vollständig einlösen, bleibt ein Restwert auf dem Gutschein bestehen. Sie können diesen im Rahmen späterer Bestellungen innerhalb der Laufzeit des Gutscheins einlösen.

Der Gutschein ist drei Jahre ab Kaufdatum (siehe Ablaufdatum) einlösbar und kann nur auf [www.spektrum.de/shop](http://www.spektrum.de/shop) angewandt werden. Weder die Gesamtbestellung eines Jahres noch die Anzahl der Bestellungen sind begrenzt. Der Gutschein ist übertragbar. Spektrum für Wissenschaftsbücher übernimmt keine Haftung für Verlust, Diebstahl, Zerstörung oder anderweitige Nutzung von Spektrogramm-Gutscheinen.  
Kontakt: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstraße 35-37, 10245 Berlin, [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de), Tel.: (030) 219126-742

Betrag:  Gutscheincode:  Ablaufdatum:

## Ein Geschenk, das ankommt!

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

[spektrum.de/aktion/gutscheine](http://spektrum.de/aktion/gutscheine)

**GUTSCHEIN €20,-**  
Spektrum|VERLAG

**GUTSCHEIN €50,-**  
Spektrum|VERLAG

**GUTSCHEIN €100,-**  
Spektrum|VERLAG

# MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

# HAPPY END FÜR EIN

# GROSSES MATHERÄTSEL

Drei junge Freunde stellen sich ein geometrisches Rätsel und finden bis an ihr Lebensende keine Lösung, obwohl sie zu den einflussreichsten Mathematikern ihrer Zeit heranwachsen. Nun gibt es einen Durchbruch.



Kevin Hartnett ist Wissenschaftsjournalist in Columbia (South Carolina).

» [spektrum.de/artikel/1527665](https://www.spektrum.de/artikel/1527665)

ORENSILA / GETTY IMAGES / ISTOCK

Ein gutes Mathematikproblem zeichnet sich dadurch aus, dass man bei seiner Lösung auf unerwartete Entdeckungen stößt. So erging es 1933 der 23-jährigen Studentin Eszter Klein aus Budapest mit einer Aufgabe, die sie ihren Freunden Pál Erdős und György Szekeres stellte: Beweise, dass man aus fünf willkürlich verteilten Punkten, von denen keine drei auf einer Geraden liegen, immer ein konvexes (keine Einbuchtung aufweisendes) Viereck konstruieren kann (siehe Bild unten).

Nach der Lösung des Rätsels dachten die drei Mathematiker weiter darüber nach: Wenn fünf Punkte genügen, um mit Sicherheit ein konvexes Viereck zu finden, wie viele Punkte benötigt man, damit garantiert ein konvexes Fünfeck oder Elfeck unter ihnen ist? Oder allgemein ein konvexes  $n$ -Eck für ein beliebiges  $n$ ?

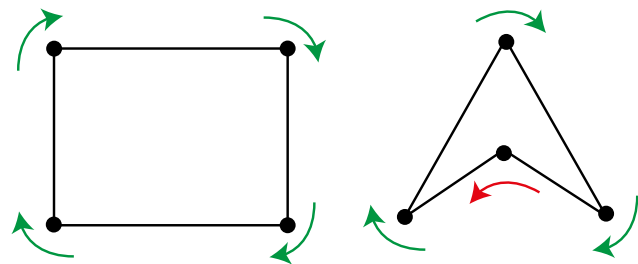
Bis 1935 hatten Erdős und Szekeres das Problem für  $n=3, 4$  und  $5$  gelöst. Jedes Dreieck ist konvex; also genügen für ein Dreieck drei beliebige Punkte. Für ein konvexes Viereck braucht man die genannten fünf Punkte und für ein konvexes Fünfeck neun (Bild S. 78 oben).

In der zugehörigen Veröffentlichung gaben Erdős und Szekeres auch eine Vermutung für den allgemeinen Fall an: Unter  $2^{n-2}+1$  Punkten würde man garantiert ein konvexes  $n$ -Eck finden. Wohlgermerkt: unter  $2^{n-2}+1$  willkürlich gewählten Punkten. Man darf sich durchaus einen böswilligen Gegner vorstellen, der einem diese Anzahl von Punkten aufs Papier malt mit der Absicht, die Existenz eines konvexen  $n$ -Ecks zu vereiteln. Jeder Beweis der Vermutung muss also mit jeder beliebigen vorgegebenen Punktmenge zu Rande kommen; nur die Anzahl der Punkte ist festgelegt.

Für den Beweis dieser Formel schrieb Erdős ein Preisgeld von 500 Dollar aus, wie er es mit vielen ungelösten Problemen tat.

Erdős nannte das Rätsel »happy ending problem« – nicht aus mathematischen Gründen, sondern wegen der Folgen der vielen Diskussionen unter den drei Freunden: Eszter Klein und György Szekeres verliebten sich und heirateten am 13. Juni 1937. Erdős dagegen stieg zwar zu Weltruhm auf und wurde insbesondere bekannt als der Mathematiker mit den meisten Koautoren, blieb aber sein Leben lang Junggeselle.

In den folgenden Jahrzehnten machten Forscher keinerlei Fortschritte bei der Lösung des Problems. Erst gegen Ende seines Lebens, um 2005, löste Szekeres gemeinsam mit dem australischen Physiker Lindsay Peters und kräftiger Computerunterstützung den Fall  $n=6$ : Unter 17 Punkten findet man stets ein konvexes Sechseck, in Übereinstimmung mit der vermuteten Formel.



Wenn man ein konvexes Polygon (links) entlangwandert, biegt man an jeder Ecke in dieselbe Richtung ab. Das ist bei einem nichtkonvexen Vieleck (rechts) nicht der Fall.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE





ORENSILA / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

**Unter einer großen Anzahl zufällig angeordneter Punkte findet man in den allermeisten Fällen konvexe Vielecke, auch solche mit großer Seitenzahl. Aber die Happy-ending-Vermutung besagt, dass das auch für böswillig angeordnete Punkte gelten muss.**

Nun hat Andrew Suk von der University of Illinois in Chicago den Beweis geliefert, dass Erdős und Szekeres vor knapp 80 Jahren richtig vermutet hatten – fast.

### Zerteilte Figuren

Beim Happy-ending-Problem geht es im Wesentlichen darum, einem konvexen  $n$ -Eck eine Ecke hinzuzufügen, und zwar so, dass das entstehende  $(n+1)$ -Eck wieder konvex ist. Die zusätzliche Ecke muss man aus dem Vorrat der übrigen vorgegebenen Punkte entnehmen. Vielleicht gibt es aber darunter keinen Punkt, der zusammen mit dem  $n$ -Eck ein konvexes  $(n+1)$ -Eck ergibt. Dann muss man mit einem anderen  $n$ -Eck anfangen. Auf diese Weise versucht man, sich von  $n=3, 4$  und  $5$  zu größeren Werten hochzuarbeiten. Dabei gilt es, sorgfältig Buch zu führen: Wie viele Punkte muss die vorgegebene Menge enthalten, damit jeder einzelne Schritt gelingt?

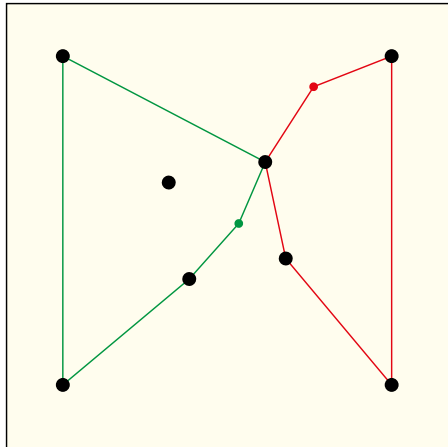
Erdős und Szekeres konnten ihre Formel nicht beweisen, sie hatten aber das richtige Gespür dafür, wie ein Nachweis aussehen könnte. In ihrer 1935 erschienenen Arbeit zerlegten sie konvexe Vielecke in ein »Unterteil« und ein »Oberteil«. Das heißt, sie zogen irgendeine Gerade durch das Vieleck und betrachteten zunächst nur dessen Teile beiderseits der Geraden. Im Englischen haben sich für diese Teile die Bezeichnungen »cup« für unten und »cap« für oben eingebürgert. Da es im Deutschen dieses

Wortspiel nicht gibt und man nur selten eine Tasse mit einer Mütze bedeckt, soll im Folgenden von »Woks« und »Deckeln« die Rede sein. Ein Wok besteht also aus einer Menge an Punkten in Form eines  $u$ , während die Punkte eines Deckels  $n$ -förmig nach oben gewölbt sind. Genauer: Die Punkte eines Woks (Deckels) gehören zum Graphen einer konvexen (konkaven) Funktion.

Diese Zerlegung vereinfachte das Problem. Einen Wok oder einen Deckel um einen Punkt zu erweitern und dabei die geforderte Form beizubehalten, ist nämlich sehr simpel: Man hängt beispielsweise an einem Ende der Figur den weiteren Punkt an (Bild S. 78 unten). Bei einem kompletten Vieleck ist die Menge der zulässigen Punkte viel unübersichtlicher.

In derselben Arbeit bewiesen Erdős und Szekeres das später so genannte »cups-caps theorem« (»Wok-Deckel-Theorem«). Dieses gibt an, wie viele willkürlich verteilte Punkte nötig sind, damit mit Sicherheit ein Deckel oder ein Wok mit  $n$  Punkten (kurz:  $n$ -Deckel oder  $n$ -Wok) unter ihnen ist. Das Wok-Deckel-Theorem liefert auf einleuchtende Weise eine obere Schranke für das Happy-ending-Problem: Aus einem  $n$ -Wok kann man immer ein konvexes  $n$ -Eck machen, indem man seine beiden Endpunkte durch eine gerade Strecke verbindet – nicht unbedingt der geschickteste Weg, ein konvexes Polygon zu konstruieren, aber ein funktionierender.

Unter acht Punkten, die geeignet böseartig angeordnet sind, findet man kein konvexes Fünfeck – wohl aber, wenn man irgendeinen Punkt (zum Beispiel den roten oder den grünen) hinzufügt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

Jahrelang versuchten die Mathematiker Deckel auf Woks zu setzen und kamen nicht recht voran. Zu einem großen Wok – der nach dem Wok-Deckel-Theorem existieren musste – hätte man einen passenden Deckel finden müssen. Damit dieser aber strikt oberhalb des Woks liegt, musste man von Wok oder Deckel oder beiden so viele Punkte wegnehmen, dass es schon nicht mehr lohnte.

»Das entstandene Polygon bestünde am Ende aus so wenigen Seiten, dass das Verbinden eines Deckels mit einem Wok nicht besser wäre, als direkt nach einzelnen großen Woks oder Deckeln zu suchen. Man verliert durch die Methode mehr, als man durch sie gewinnt«, sagte Gábor Tardos vom Alfréd-Rényi-Institut für Mathematik der Ungarischen Akademie der Wissenschaften in Budapest. »Das war das wesentliche Hindernis.«

Doch Andrew Suk fand einen Weg, es zu umgehen.

Nach dem Wok-Deckel-Theorem findet sich unter  $4^n$  willkürlich verteilten Punkten garantiert ein  $n$ -Deckel oder  $n$ -Wok und damit auch ein konvexes  $n$ -Eck. Allerdings ist  $4^n$  exponentiell größer als die von Erdős und Szekeres vermutete Anzahl  $2^{n-2} + 1$ , was die naive Anwendung des Theorems eher uninteressant macht: Was hilft es schon zu wissen, dass unter  $4^{12} \approx 16,8$  Millionen Punkten garantiert ein konvexes Zwölfeck ist, wenn man eigentlich beweisen möchte, dass  $2^{10} + 1 = 1025$  Punkte auch schon ausreichen?

Erdős und Szekeres wussten, dass ein anderer Weg zum Ziel führen musste: Man setze einen geeigneten Deckel auf einen geeigneten Wok. Das ist nicht so einfach, wie es klingt: Irgendein Deckel auf irgendeinem Wok ergibt nicht unbedingt ein konvexes Vieleck. Damit der Deckel passt, muss er sich »strikt oberhalb« des Woks befinden. Das heißt, dass jede Linie, die zwei beliebige Punkte des Deckels verbindet, oberhalb aller Punkte des Woks verlaufen muss.

### Zacken sortieren

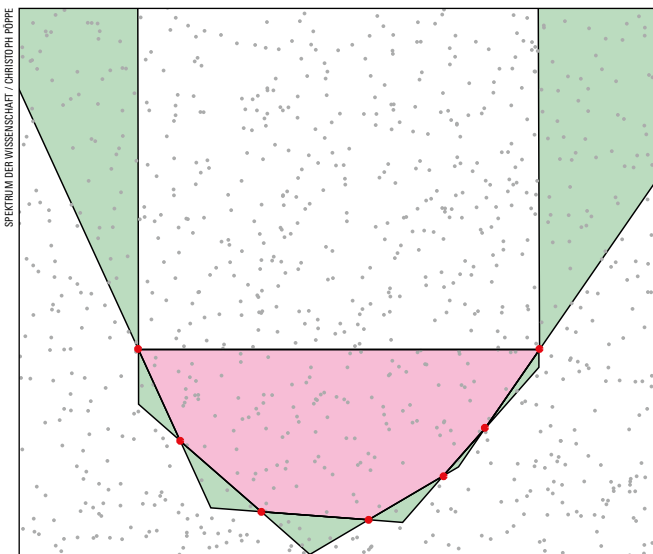
Suks Arbeit basiert auf einem Teilgebiet der Mathematik, das so alt ist wie das Happy-ending-Problem selbst: der Ramsey-Theorie (**Spektrum** September 1990, S. 112). Sie besagt grob gesprochen, dass jede große ungeordnete Menge – insbesondere willkürlich verteilte Punkte auf einer Ebene – stets eine geordnete Teilmenge enthält. Wenige Jahre bevor Klein ihren zwei Freunden ihr Rätsel vorstellte, hatte der britische Mathematiker Frank Plurpton Ramsey (1903–1930) die nach ihm benannte Theorie gefunden, und Erdős und Szekeres entdeckten sie während ihrer Arbeit am Happy-ending-Problem aufs Neue.

In diesem Kontext besagt die Ramsey-Theorie, dass es unter ausreichend vielen willkürlich verteilten Punkten stets ein konvexes  $n$ -Eck geben muss. Suk musste aber noch viele weitere Folgerungen der Ramsey-Theorie nutzen, um die erforderliche Anzahl dieser Punkte anzugeben.

Mit Hilfe der Ramsey-Theorie teilte er die Gesamtheit der gegebenen Punkte in Teilmengen auf, die »in konvexer Position zueinander« stehen, das heißt: Nimmt man aus jeder Teilmenge einen Punkt, so ergibt sich ein konvexes Vieleck. Er berechnete, wie viele solcher Teilmengen er definieren kann und – ungefähr – wie viele Punkte jede von ihnen enthält. Jede der Teilmengen liegt in einer dreieckigen »Zacke«, und alle Zacken umschließen einen Bereich, den Mathematiker konvexe Hülle nennen (Bilder rechts oben). Wohlgedenkt: Suk bewegt bei dieser Aktion niemals Punkte, sondern ordnet sie lediglich in Teilmengen ein.

Anschließend denkt er über Teilmengen innerhalb der einzelnen Zacken nach, mit dem Ziel zu beweisen, dass es innerhalb jedes Zackens entweder einen Deckel oder einen Wok einer gewissen Größe geben muss. Und da alle Zacken in konvexer Position zueinander stehen, lassen sich die Deckel und Woks verschiedener Zacken miteinander zu dem gesuchten  $n$ -Eck verbinden.

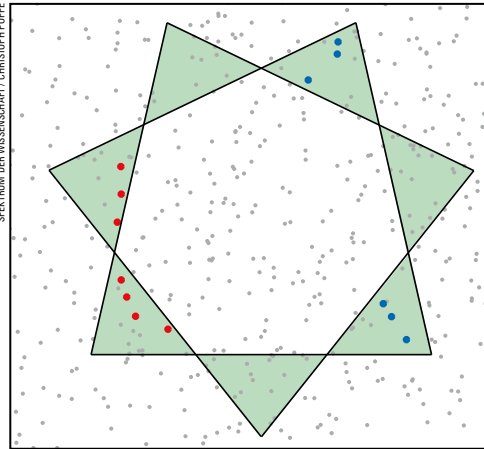
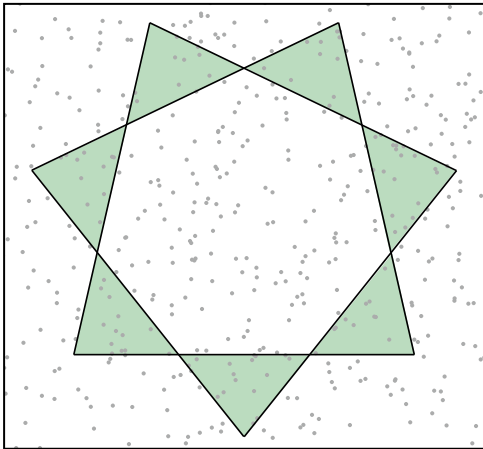
Um die Woks und Deckel innerhalb der Zacken zu finden, nutzte Suk den Satz von Dilworth aus der Ramsey-Theorie. Dieser besagt, dass es in jedem Zacken eine Mindestzahl an Punkten gibt, die auf eine von zwei verschiedenen Arten angeordnet sind: Entweder erweitern jeweils zwei dieser Punkte die konvexe Hülle – eine solche Ansammlung von Punkten wird Antikette genannt. Oder



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

Ein Wok (rote Punkte) bleibt ein Wok, wenn man einen Punkt in einer der grünen Flächen hinzufügt. Auf diesen Wok passt jeder Deckel, der seine Endpunkte in den beiden unbeschränkten grünen Flächen hat.





**Nimmt man aus jedem der grün eingefärbten Zacken einen Punkt, so ergibt sich ein konvexes Vieleck (links). Innerhalb der Zacken identifiziert Andrew Suk (blaue) Ketten und (rote) Antiketten (rechts). Aus diesen Punkten konstruiert er  $n$ -Woks oder  $n$ -Deckel.**

jeweils zwei dieser Punkte sind so angeordnet, dass sie nicht konvex zur Hülle stehen; das sind so genannte Ketten. In dem Bild oben rechts bilden die blauen Punkte Ketten und die roten Punkte Antiketten.

Im nächsten Schritt fand Suk die Deckel und Woks, indem er die Punkte unterschiedlicher Zacken miteinander verband. Aus einem anderen Argument der Ramsey-Theorie, dem Taubenschlagprinzip, folgerte er, dass es für die in den Zacken befindlichen Ketten und Antiketten nur zwei Möglichkeiten gibt:

- Entweder überwiegen die (roten) Antiketten. Falls eine dieser Ketten einen Wok aus  $n$  Punkten enthält, hat Suk das gesuchte  $n$ -Eck gefunden. Falls nicht, folgt nach dem Wok-Deckel-Theorem, dass die Ketten kleinere Deckel enthalten. Aus ihnen kann er einen größeren konvexen  $n$ -Deckel bilden – und damit abermals ein konvexes  $n$ -Eck.
- Oder die (blauen) Ketten sind in der Mehrheit. In diesem Fall geht Suk die Zacken der Reihe nach durch und prüft, ob er durch Kombination von Woks und Deckeln verschiedener Zacken zu einem konvexen  $n$ -Eck kommt. Der schlimmste Fall tritt ein, wenn ihm das in keinem der Schritte gelingt. Doch dann muss die letzte Zacke einen aus  $n$  Punkten bestehenden Deckel beinhalten.

»Ich wende das Argument wieder und wieder an, so dass ich am Ende ein  $n$ -Eck finden muss«, sagte Suk.

### Fast geschafft

Insgesamt liefert die Arbeit zwar noch nicht den endgültigen Beweis, aber doch sehr starke Indizien dafür, dass die Vermutung von Erdős und Szekeres richtig ist. Suk hat die zuvor bewiesene obere Schranke des Problems von  $4^n$  auf einen Wert verringert, der für große Werte von  $n$  dem von Erdős und Szekeres sehr nahe kommt. Seine Formel lautet  $2^{n+6n^{2/3}\log n}$ , ein Wert, den Gábor Tardos inzwischen ein Stück verbessern konnte.

»Ich denke, es hätte niemanden gewundert, wenn die Wahrheit eher bei  $4^n$  gelegen hätte. Jetzt wissen wir definitiv, dass die Vermutung zumindest grob stimmt. Das legt nahe, dass die Vermutung für alle  $n$  richtig ist«, sagt János Pach, ein angesehener Kombinatoriker der École polytechnique fédérale de Lausanne (Schweiz) und Suks Betreuer während seines Studiums an der New York University.

Selbst wenn sich führende Experten darüber einig sind, ob eine Vermutung wahr oder falsch ist, benötigt man meist neue und komplizierte mathematische Methoden, um diese tatsächlich zu beweisen. Das war hier nicht der Fall: Suk folgte dem Weg, den seine Vorgänger von Anfang an gewiesen hatten.

»Der Beweis ist sehr clever und elementar. Erdős und Szekeres hätten ihn selbst entwickeln können«, sagt Ron Graham, langjähriger Freund und Kollege von Erdős. Pach fügt hinzu: »Ich denke, Erdős und Szekeres wären extrem froh darüber, dass sie tatsächlich der richtigen Spur folgten und dass ihre Ideen letztlich verwirklicht wurden.«

Keiner der drei Mathematiker, die sich ursprünglich mit dem Problem befasst hatten, ist heute noch am Leben. Erdős starb 1996, lebt aber in seinen vielen Geldpreisen weiter, die Graham größtenteils verwaltet. Szekeres überlebte Erdős um fast ein Jahrzehnt. Er und Klein waren beide Mitte 90, als sie 2005 in ein Altersheim in Adelaide zogen. Sie starben beide am 28. August 2005 kurz nacheinander – 70 Jahre nach der Geburt des Happy-ending-Problems und etwa ein Jahrzehnt, bevor es fast endgültig gelöst wurde. ◀

### QUELLEN

**Erdős, P., Szekeres, G.:** A Combinatorial Problem in Geometry. In: *Compositio Mathematica* 2, S. 463–470, 1935

**Erdős, P., Szekeres, G.:** On some Extremum Problems in Elementary Geometry. In: *Annales Universitatis Scientiarum Budapest Rolandó Eötvös, Sectio Mathematica* 3–4, S. 53–62, 1962

**Suk, A.:** On the Erdős-Szekeres Convex Polygon Problem. In: *Journal of the American Mathematical Society* 30, S. 1047–1053, 2017

**Szekeres, G., Peters, L.:** Computer Solution to the 17-Point Erdős-Szekeres Problem. In: *ANZIAM Journal* 48, S. 151–164, 2006

Übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »A Puzzle of Clever Connections Nears a Happy End« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus der Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

# GLEICHBERECHTIGUNG DIE AKADEMISCHE GENIEFALLE

**SERIE: GENDER** In manchen Disziplinen gilt intellektuelle Brillanz als besonders wichtig für großen Erfolg. Auf Grund hartnäckiger Vorurteile haben Frauen in diesen Fächern oft das Nachsehen.



**Andrei Cimpian** ist Assistenzprofessor für Psychologie an der New York University. **Sarah-Jane Leslie** lehrt als mehrfach ausgezeichnete Professorin für Philosophie an der Princeton University im US-Bundesstaat New Jersey.

► [spektrum.de/artikel/1527667](https://www.spektrum.de/artikel/1527667)

► Zu Beginn der 1980er Jahre war unter amerikanischen Philosophen oft die Rede von »The Beam« – einem Strahl intellektueller Brillanz, der wie ein Schlaglicht die kompliziertesten philosophischen Rätsel zu erhellen vermochte. Nur wenige Denker seien mit dieser Gabe ausgestattet, und ihr Werk repräsentiere den Maßstab für geistiges Gelingen. Wem dieser Glanz fehlte, der war auf ewig dazu verdammt, intellektuell im Schatten zu stehen.

Diese Geschichte kam jedes Mal zur Sprache, wenn wir beide uns bei einer Konferenz trafen. Wir hatten zwar unterschiedliche Fächer studiert – Leslie Philosophie, Cimpian Psychologie –, bearbeiteten aber ähnliche Themen. Also tauschten wir uns regelmäßig über unsere Erfahrungen im jeweiligen Fachgebiet aus. Psychologie und Philosophie haben viel gemeinsam; bis ins 19. Jahrhundert war die Psychologie eine philosophische Teildisziplin. Dennoch galten unseren Eindrücken nach in beiden Gebieten höchst unterschiedliche Erfolgskriterien. Philosophen legen größten Wert auf das persönliche Auftreten – am besten als brillanter Superstar mit herausragenden geistigen Fähigkeiten. Hingegen glauben Psychologen eher, die führenden Köpfe des Fachs hätten ihren Status durch harte Arbeit und Erfahrung erworben.

Zunächst sahen wir in der Geniebesessenheit der Philosophen nur eine Marotte, ein bisschen seltsam, aber harmlos. Für Leslie stand vielmehr im Vordergrund, dass ihr Fach keine Anziehung auf Frauen und Minderheiten auszuüben schien. Trotz aller Versuche, das Blatt zu wenden, waren in den Vereinigten Staaten bloß 30 Prozent aller anno 2015 in Philosophie promovierten Personen weiblich, und Afroamerikaner beiderlei Geschlechts stell-



RYAN KING/GETTY IMAGES / STOCK



ten sogar nur 1 Prozent der promovierten Philosophen. Ganz anders die im selben Jahr verliehenen Doktorgrade in Psychologie: 72 Prozent Frauen und immerhin 6 Prozent Afroamerikaner – womit Letztere jedoch noch immer stark unterrepräsentiert waren.

Aus der Diskrepanz wurden wir einfach nicht schlau. Unsere Fächer haben so viel gemeinsam: Beide fragen, wie die Menschen die Welt wahrnehmen und begreifen, wie sie zwischen richtig und falsch unterscheiden, wie sie Sprache lernen und gebrauchen, und so weiter. Selbst die wenigen Unterschiede, beispielsweise die Anwendung von Statistik und randomisierten Experimenten in der Psychologie, verwischen sich, seit die so genannte experimentelle Philosophie ebenfalls Befragungen und Versuchs-

SERIE

### Frauen weltweit

Teil 1: Dezember 2017

#### Die beste Entwicklungshilfe

Ana L. Revenga und Ana Maria Munoz-Boudet

Teil 2: Januar 2018

#### Die Rückkehr der Mädchen

Monica Das Gupta

Teil 3: Februar 2018

#### Die akademische Geniefalle

Andrei Cimpian und Sarah-Jane Leslie

**In Fächern wie Pädagogik oder Soziologie ist der Frauenanteil unter den Promovierenden hoch. Disziplinen, die scheinbar geistige Brillanz erfordern, sind meist Männerdomänen.**



anordnungen verwendet, um Themen wie Moral und Willensfreiheit zu erforschen. Wie können derart eng verwandte Gebiete so unterschiedliche Personenkreise anziehen?

### **Praktischer Realismus trifft auf lauter Philosophen: Denken Frauen und Männer verschieden?**

Unser gemeinsames Aha-Erlebnis hatten wir vor einigen Jahren. Am Rand einer Konferenz aßen wir mit einer Gruppe von Philosophen und Psychologen zu Abend, und zufällig kamen kurz hintereinander der Geniekult der Philosophen und der unter ihnen herrschende Frauenmangel zur Sprache. Das brachte uns erstmals auf die Idee, zwischen beidem bestehe ein Zusammenhang. Wir fragten uns, ob intellektueller Glanz bei Frauen und Afroamerikanern leichter übersehen wird. Ist das Beharren auf einem scharfen Intellekt als Eintrittsvoraussetzung in ein spezielles Gebiet praktisch gleichbedeutend mit einem Verbotsschild für jeden Neuling, der anders aussieht als die drinnen?

Auf den ersten Blick wirkt die Betonung geistiger Vorzüge nicht diskriminierend, denn nach wissenschaftlichem Kenntnisstand hängen kognitive Fähigkeiten weder von sexueller noch von ethnischer Zugehörigkeit ab. Philosophen erstreben eine bestimmte Geisteshaltung, unabhängig davon, wem der Geist gehört. Diese scheinbar selbstverständliche Präferenz wird allerdings sofort zum Problem, wenn bestimmte Stereotype ins Spiel kommen, die einen überlegenen Intellekt fälschlicherweise primär mit gewissen Gruppen assoziieren – zum Beispiel mit männlichen Weißen.

Selbst unter den an jenem Abend anwesenden Akademikern war zu hören, dass Männer und Frauen einfach verschieden dächten. Frauen seien praktischer und realistischer, während Männer eher zu jenem spekulativen, abstrakten Rasonieren neigten, das nun einmal als Zeichen philosophischer Brillanz gelte. Wir begannen uns zu fragen, ob die Gleichsetzung von Brillanz mit Männlichkeit Frauen davon abschrecke, ein wissenschaftliches Gebiet

zu betreten, in dem diese Qualität hohen Stellenwert genießt. Außerdem dürften die bereits etablierten Mitglieder eines solchen Felds Männer und Frauen unterschiedlich einschätzen und sie deshalb nicht gleichermaßen unterstützen. Das Gleiche gilt für die ethnische Zugehörigkeit: In den USA haben Afroamerikaner seit jeher als intellektuell unterlegen gegolten, was sich natürlich verstärkt in einem Bereich auswirkt, der großen Wert auf geistigen Glanz legt. Angesichts dieser Stereotype, für die es keine wissenschaftliche Begründung gibt, lag der Verdacht nahe, dass der unter Philosophen verbreitete Geniekult die sexuelle und ethnische Vielfalt der ganzen Disziplin beeinflusst.

Wir überlegten dann, ob das auch für andere Fachgebiete gilt. Unter Akademikern ist generell viel von Brillanz die Rede, vor allem in Fächern wie Naturwissenschaft, Technik, Ingenieurwissenschaft und Mathematik, in denen die Diversität ebenfalls zu wünschen übrig lässt. Verriet unser eher zufälliger Vergleich von Philosophie und Psychologie gar etwas über den Mangel an Frauen und Minoritäten in bestimmten Disziplinen?

Vielleicht konnte unsere Brillanz-Hypothese ja erklären, warum die geschlechtliche und ethnische Diskriminierung so deutlich variiert, wenn man unterschiedliche akademische Fächer betrachtet. Beispielsweise gibt es fast 50 Prozent weibliche Promovierte in Biochemie, aber in organischer Chemie nur etwas über 30 Prozent. Die Differenz lässt sich weder durch die recht ähnlichen Forschungsinhalte erklären noch durch die Geschichte, denn die Biochemie trennte sich von der organischen Chemie ungefähr so spät wie die Psychologie von der Philosophie. Also fragten wir uns, ob die demografischen Unterschiede zwischen so eng verwandten Feldern etwas damit zu tun haben, wie sehr sie herausragendes intellektuelles Talent als Schlüssel zum Erfolg betonen.

### **Eine Geisteshaltung, die Fehler als Chance zur Verbesserung begreift**

Bei diesen Überlegungen fielen uns die umfangreichen Arbeiten der Psychologin Carol Dweck von der Stanford University in Kalifornien ein. Wie Dweck gezeigt hat, wirkt sich die Einstellung zur eigenen Fähigkeit stark auf den Erfolg aus, den man schließlich erringt. Eine Person, die Talent für eine unveränderliche Charaktereigenschaft hält, vertritt gemäß Dwecks Terminologie eine »starre Denkart« (fixed mindset): Die Person neigt dazu, ihre Fähigkeit zwar durchaus einzusetzen, aber Fehler zu meiden, weil sie glaubt, die starren Grenzen ihrer Begabung zu kennen. Wer hingegen eine »wachstumsorientierte Denkart« (growth mindset) vertritt, betrachtet die aktuelle Fähigkeit als eine formbare Größe, die sich im Prinzip durch besondere Anstrengung und geschickten Einsatz steigern lässt. Für eine solche Person sind Fehler kein Verhängnis, sondern wertvolle Signale, die anzeigen, an welchen Fertigkeiten sie noch arbeiten muss.

Ursprünglich untersuchte Dweck die Denkart von Individuen; kürzlich jedoch stellte sie zusammen mit Mary Murphy, die jetzt an der Indiana University in Bloomington forscht, die These auf, dass auch organisierte Gruppen wie

## **AUF EINEN BLICK HEMMSCHUH »BRILLANZ«**

- 1** Akademische Fächer, die besonderen Wert auf die intellektuelle Brillanz ihrer Mitglieder legen, weisen eine besonders geringe geschlechtliche und ethnische Diversität auf.
- 2** Obwohl angeborene kognitive Fähigkeiten nachweislich nicht von Geschlecht oder Ethnie abhängen, schreibt man Frauen und Afroamerikanern seltener außerordentliche Intelligenz zu als weißen Männern.
- 3** Vorurteile entmutigen diese Gruppen offenbar, eine akademische Karriere in Fächern anzustreben, die geistige Brillanz als Voraussetzung betonen.



Firmen oder Klubs derartige Ansichten hegen. Wir trieben die Idee noch ein Stück weiter und überlegten, ob solche Denkart womöglich ganze Fachgebiete beherrschen. Der in Philosophie und anderen Fächern übliche Geniekult erzeugt offenbar eine Atmosphäre, in der intellektueller Glanz belohnt und dessen Mangel um jeden Preis vermieden wird. In Kombination mit gängigen Vorurteilen über die geringere intellektuelle Begabung ganzer Menschengruppen kann dies Frauen und Afroamerikanern leicht zum Nachteil geraten. Immerhin nimmt man Fehler und Unzulänglichkeiten bevorzugt dort wahr, wo man sie von vornherein erwartet.

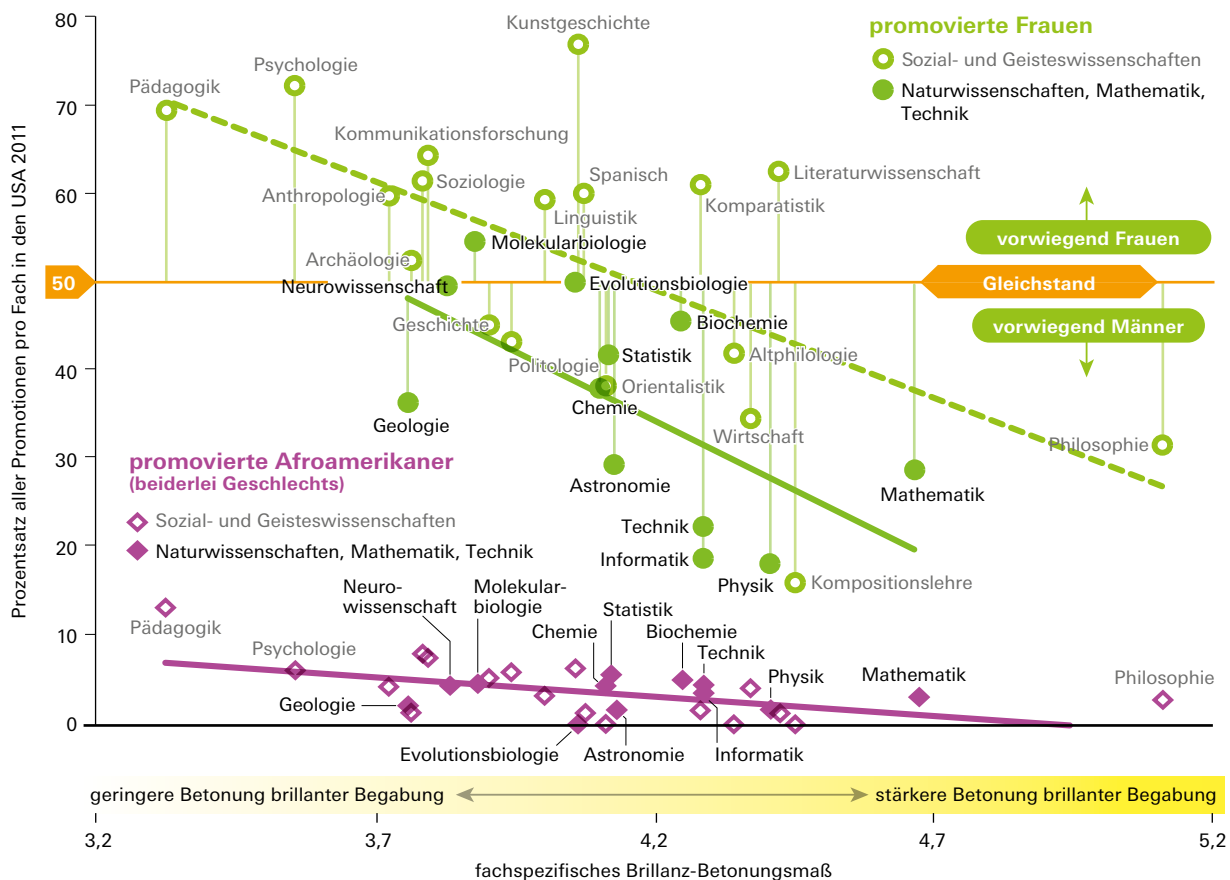
Gemeinsam entwickelten wir einen Plan, um unsere Ideen zu testen. Wir wollten Akademiker aus vielen ver-

schiedenen Disziplinen fragen, ob der Erfolg in ihrem Fach ein außerordentliches intellektuelles Talent erfordere. Dann würden wir Statistiken der National Science Foundation konsultieren, die über die geschlechtliche und ethnische Zusammensetzung der in diesen Disziplinen promovierten Personen Auskunft geben. Falls wir mit unserer Vermutung Recht hatten, gab es in den Fächern, die besonderen Wert auf Brillanz legen, weniger promovierte Frauen und Afroamerikaner. Das sollte nicht nur im Großen und Ganzen beim Vergleich zwischen Natur- und Geisteswissenschaften gelten, sondern auch im Kleinen für eng benachbarte Felder wie Philosophie und Psychologie.

Nach mehr als einem Jahr und Tausenden von E-Mails besaßen wir gemeinsam mit Meredith Meyer von der

## Wie akademische Stereotype Frauen und Minderheiten diskriminieren

Eine Befragung von fast 2000 Akademikern aus 30 Fachgebieten erhob, wie sehr sie glaubten, dass intellektuelle Brillanz für Erfolg in ihrer Disziplin ausschlaggebend sei. In Fächern wie Physik, Mathematik und Philosophie, in denen besonders großer Wert auf Genialität gelegt wurde, gab es in den USA weniger Promotionen von Frauen und Afroamerikanern als etwa in Neurowissenschaft oder Psychologie, wo Brillanz eine geringere Rolle spielte. Die Ergebnisse zeigen, dass Genie vorwiegend weißen Männern zugetraut wird.



JEN CHRISTIANSEN, NACH LESLIE S.-J. ET AL.: EXPECTATIONS OF BRILLIANCE UNDERLIE GENDER DISTRIBUTIONS ACROSS ACADEMIC DISCIPLINES. IN: SCIENCE 347, S. 262-265, 2015 / SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2017

Otterbein University in Ohio und Edward Freeland von der Princeton University Antworten von fast 2000 Akademikern aus 30 Forschungsfeldern. Sie bestätigten unsere Annahme: Je stärker die Fixierung auf Brillanz, desto weniger Doktorgrade wurden an Frauen und Afroamerikaner verliehen. Deren jeweiliger Anteil war zum Beispiel in Psychologie größer als in Philosophie, Mathematik oder Physik.

Dann betrachteten wir die Antworten aus den physikalischen und biologischen Wissenschaften getrennt von denjenigen, die von Geistes- und Sozialwissenschaftlern stammten. Wie sich ergab, traf unsere Annahme auch dann zu, wenn wir Untergruppen bildeten und etwa Physik mit Biologie verglichen oder Philosophie mit Soziologie. Anscheinend galt die Brillanz-Hypothese ganz allgemein für das gesamte akademische Spektrum.

### **Nicht ihre Vorlieben, sondern der Geniekult hält Frauen von bestimmten Disziplinen fern**

Allerdings hatten wir damit zunächst nur einen statistischen Zusammenhang zwischen Geniekult und Diskriminierung in bestimmten Bereichen hergestellt, aber nicht Ursache und Wirkung bewiesen. Man hat im Lauf der Jahre viele andere Erklärungen für akademischen Frauenmangel vorgeschlagen. Beispielsweise: In dem betreffenden Fach herrsche eine besondere Arbeitsbelastung, mit der Junggesellen sowie mit Hausfrauen verheiratete Männer besser zurechtkämen. Oder: Frauen hätten eine natürliche Vorliebe, sich mit lebenden Organismen zu beschäftigen statt mit leblosen Objekten. Wir mussten herausfinden, ob unsere Hypothese wirklich etwas Neues brachte; vielleicht war sie nur eine alte Erklärung in neuem Gewand.

Sorgfältig prüften wir die verbreitetsten Alternativen. Gab unser Maß für Brillanz beispielsweise bloß die unter-

## **Offenbar verinnerlichen schon Grundschul Kinder jene Stereotype, die Rechnen mit Jungen und Lesen mit Mädchen verbinden**

schiedlich große Rolle der Mathematik in verschiedenen Forschungsgebieten wieder? Wir betrachteten den Mathematikanteil in den Zulassungsprüfungen für Doktoranden: Der Glaube an Brillanz sagte den Frauenanteil viel besser voraus. Ebenso fanden wir keinen Beleg für die verbreitete Meinung, in »fordernden« Fächern seien Frauen unterrepräsentiert, weil sie sich mehr Zeit für die Familie wünschten. Wir fragten die Akademiker unserer Stichprobe, wie viele Stunden pro Woche sie arbeiteten – sowohl in der Universität als auch außerhalb. Doch selbst bei Berücksichtigung unterschiedlicher Arbeitsbelastung sagte der Geniekult den Frauenanteil in allen 30 untersuchten Disziplinen am besten voraus. Wir untersuchten auch die vorherrschende Meinung, dass Frauen lieber mit Menschen arbeiten und sie intuitiv besser verstehen, während Männer unbelebte

Systeme bevorzugen. Dagegen sprechen aber unter anderem die vielen Zweige der Philosophie, die vom Menschen handeln und dennoch von Männern dominiert werden.

Nun wollten wir wissen, ob die Einstellung zur Brillanz schon in frühen Phasen des Studiengangs den Anteil von Frauen und Minoritäten prägt. Wir testeten unsere Idee anhand von Studenten auf Bachelor-Niveau, das den Eintritt in eine spätere akademische Karriere markiert. Beeinflussen Aussagen über die Wichtigkeit brillanter Begabung die Wahl des Fachs, in dem junge Frauen und Afroamerikaner ihr Studium fortsetzen?

Die Antwort ist Ja. In einer 2016 publizierten Arbeit analysierten wir anonyme Bewertungen von Dozenten durch ihre Studenten auf der Website »RateMyProfessors.com«. Die Vorlesungskritiken beschrieben männliche Professoren fast doppelt so oft wie weibliche als »brillant« oder »genial«. Hingegen gebrauchten die Studenten Ausdrücke wie »hervorragend« oder »toll« im normalen Internetverkehr gleichermaßen oft für Männer und Frauen. Wie wir feststellten, hing die Häufigkeit, mit der in den Vorlesungskritiken von Brillanz und Genialität die Rede war, eng mit mangelnder Diversität am Ende des Studiums zusammen.

### **Die Assoziation von Brillanz mit Männlichkeit manifestiert sich bereits im Kindesalter**

Weitere Untersuchungen ergaben, dass auch Nichtakademiker ähnlich voreingenommen sind, welche Fächer Brillanz erfordern. Diese Meinungen können potenzielle Wissenschaftler oder Ingenieure entmutigen, eine bestimmte Laufbahn einzuschlagen, lange bevor sie den Fuß in eine Universität setzen. Deshalb mussten wir ergründen, wie solche Stereotype überhaupt erworben werden. Wann beginnen in unserer Kultur Heranwachsende zu glauben, dass es in manchen Gruppen gehäuft brillante Leute gibt? Einerseits könnte diese Meinung erst relativ spät durch nachhaltige Beeinflussung entstehen; so porträtieren die Medien oft Eltern, Lehrer, Professoren und Gleichaltrige, die vorzugsweise von männlichen Jugendlichen Brillanz erwarten. Andererseits legen entwicklungspsychologische Befunde nahe, dass bereits kleine Kinder begierig die kulturellen Einflüsse ihrer Umgebung aufsaugen. Tatsächlich haben offenbar schon Grundschul Kinder die Stereotype absorbiert, die Rechnen mit Jungen und Lesen mit Mädchen assoziieren. Demnach könnten auch Brillanz-Stereotype früh verinnerlicht werden.

Um das zu klären, befragten wir Hunderte von Fünf-, Sechs- und Siebenjährigen, ob sie das Etikett »wirklich, wirklich schlau« – unsere kindgerechte Übersetzung von »brillant« – mit ihrem Geschlecht assoziierten. Unsere im Januar 2017 im Fachjournal »Science« publizierten Resultate belegen die frühe Übernahme geschlechtsspezifischer Stereotype: Im Alter von fünf Jahren zeigten die Kinder in ihrer Selbsteinschätzung noch keinen Unterschied, doch schon sechsjährige Mädchen meinten seltener als Jungs, dass ihr Geschlecht »wirklich, wirklich schlau« sei.

Schränken diese kindlichen Stereotype die Interessen von Kindern ein? Wir stellten eine andere Gruppe von Fünf-, Sechs- und Siebenjährigen vor ungewohnte spieler-





GETTY IMAGES / JAN ERK POSTH

**Mathematik, Physik, Philosophie: Hier beherrschen Männer die Hörsäle besonders deutlich. Nicht weil Frauen sich weniger für abstrakte Formeln und Gedanken interessierten oder unbegabter wären, sondern weil ihnen – so das gängige Vorurteil – qua Geschlecht Brillanz fehle.**

sche Aufgaben, die nur etwas für »wirklich, wirklich schlaue Kinder« seien. Dann verglichen wir das Interesse von Jungs und Mädchen an diesen Aufgaben. Bei Fünfjährigen fanden wir keinen Unterschied, aber ein deutlich größeres Interesse bei sechs- und siebenjährigen Jungen. Die kindlichen Stereotype bedingen somit unmittelbar das Interesse an neuartigen Aufgaben. Je mehr ein Kind im Test Brillanz mit dem anderen Geschlecht assoziierte, desto weniger Lust hatte es, an unseren Spielen für »wirklich, wirklich schlaue Kinder« teilzunehmen. Dieser Befund spricht für eine frühe Verbindung zwischen Brillanz-Stereotypen und kindlichem Ehrgeiz. Das dürfte viele begabte Mädchen schon in der Kindheit von Fächern abbringen, die sich nach gängiger Meinung vor allem für brillante Leute eignen.

Was kann man dagegen unternehmen? Relativ einfach und wirksam wäre es schon, gegenüber Schülern und Studenten möglichst wenig von Brillanz und Genialität zu reden. Angesichts der herrschenden Vorurteile können Aussagen, die diese Eigenschaften als unbedingt nötig darstellen, talentierte Mitglieder sozial benachteiligter Gruppen entmutigen. Doch wie unsere Forschungen zeigen, beginnt die Prägung der Stereotype bereits in der

Grundschule. Deshalb wäre es falsch, mit Gegenmaßnahmen bis zur Hochschulreife zu warten. Möglichst früh sollten wir die Heranwachsenden zu einer wachstumsorientierten Denkart ermuntern, damit sie nicht fatalistisch in der starren Denkweise verharren, die gängige Vorurteile bestätigt. ◀

#### QUELLEN

**Kington, R.S.:** On Being an »African American Scientist«. In: *Scientist* 27, 2013. Online unter [www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/35251/title/On-being-an-African-American-Scientist](http://www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/35251/title/On-being-an-African-American-Scientist)

**Leslie, S.-J. et al.:** Expectations of Brilliance Underlie Gender Distribution across Academic Disciplines. In: *Science* 374, S. 262–265, 2015

**Storage, D. et al.:** The Frequency of »Brilliant« and »Genius« in Teaching Evaluations Predicts the Representation of Women and African Americans across Fields. In: *PLoS One* 11, e0150194, 2016

#### LITERATURTIPP

**Phillips, K.W.:** Der Vorteil sozialer Vielfalt. In: *Spektrum der Wissenschaft* Juli 2015, S. 63–66  
*Geschlechtliche und ethnische Diversität fördert nachweislich die Kreativität einer Gruppe.*

# 1918

## ATTESTIERTE KREATIVITÄT



Meisterhafte Zeichnung eines Kriegstanzes.

»[Australische Naturvölker] hat man bis vor kurzem auf der Stufenleiter der Kultur zu allerunterst gesetzt, ihre künstlerische Begabung jedoch seit Jahrzehnten nicht mehr in Zweifel gezogen. Sie tritt auch in den Kriegs- und Kriegstanzbildern unzweideutig zu Tage. Der kindliche Silhouettenstil der Eskimo ist bei ihnen überwunden, und auch die Physiognomien kommen zur Geltung. Ein gewisser Schematismus ist wohl mehr auf die barbarische Gesichtsbemalung als auf künstlerisches Unvermögen zurückzuführen. Vor allem überrascht aber auch hier die Lebendigkeit der Bewegungen, mit der sich der Schwung in der Waffenführung aufs beste verquickt.« *Kosmos 3, S. 49*

## ERDÖL IM PHARAONENLAND

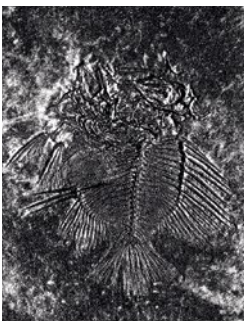
»Im Jahre 1911 hatte man in Ägypten Ölfelder entdeckt, von denen große Erträge erwartet wurden. Die Engländer glaubten hier wohl einen ähnlichen Reichtum an Öl vorzufinden wie in Mesopotamien. Ägypten hat aber eine Enttäuschung gebracht, und die Anglo-Egyptian Oil-Fields Co. hat zunächst erhebliche Verluste erlitten, bis ihr die hohen Kriegspreise einen Gewinn brachten. Immerhin reicht aber die gesamte Ölgewinnung nicht für die Versorgung des Landes aus, und es ist wenig wahrscheinlich, daß noch eine größere Steigerung der Erzeugung eintreten kann.« [Tatsächlich bildet der Export von Rohöl und Erdgas heutzutage einen der wichtigsten Wirtschaftspfeiler Ägyptens. *Die Red.*]« *Prometheus 1476, S. 196*

## WUNDERBARE LUPINE

»Die Samen der Lupine werden zunächst entbittert und ihr Alkaloid extrahiert. Es bleiben etwa 35 % Eiweißkörper, die nach Fütterungsversuchen am Menschen und am Hund wohlschmeckend und gut bekömmlich sind. Sie können als Suppenpulver oder Futtermittel verwendet, auch als Kaffeeersatz geröstet werden. Das Extrakt läßt sich aber auch mit Hopfen zu einem bierähnlichen Getränk einsieden. Die Wurzel der Lupine verbleibt im Boden, da sie diesen beträchtlich mit Stickstoff anreichert. Das Stroh dagegen kann auf Fasern verarbeitet werden.« *Die Umschau 7, S. 81*

# 1968

## MILLIONEN VON JAHREN ALT, IN WENIGEN STUNDEN PRÄPARIERT



Ein fossiler Stachelflosser aus dem Oligozän.

»In letzter Zeit ist es gelungen, eine Sandstrahlapparatur zu entwickeln, mit der sehr feine Präparate selbst aus hartem Gestein gewonnen werden können. Dafür wird ein Gemisch von Luft und Sand mit großer Geschwindigkeit gegen die zu bearbeitende Fläche geschleudert. Ausgezeichnete Erfolge erzielten wir bisher bei Fischen in den harten oligozänen Schiefen von Matt (Schweiz). Die Präparation beansprucht je nach

Größe und je nach der Zahl der Skelettelemente 8 bis 36 Stunden, während die von Hand je nach Größe 4 bis 12 Wochen in Anspruch nahm.« *Die Umschau 4, S. 122*

## ROHRPOST FÜR PASSAGIERE

»Ein System automatischer Taxis für den Grosstadtverkehr hat der britische Ingenieur Dr. L. R. Blake entworfen, das nach seiner Ansicht imstande sein würde, gegen 6000 Personen in der Stunde zu transportieren. Es handelt sich um Elektrofahrzeuge, die in einem Netz aus durchsichtigen Röhren mit einer Geschwindigkeit von 55 Stundenkilometer verkehren und durch einen Induktionsmotor angetrieben werden. Der britische Verkehrsminister hat eine Firma beauftragt, das Projekt zu untersuchen und über seine Durchführbarkeit Bericht zu erstatten.« *Neuheiten und Erfindungen 376, S. 14*

## WARUM DIE SAURIER WIRKLICH AUSSTARBEN

»Für das Aussterben der Saurier und anderer Tierarten am Ende des Mesozoikums ist nach einer These eines amerikanischen Wissenschaftlers das Selen verantwortlich, das beim Zerfall von selenhaltigen Gesteinen frei wird. [Es ist] von der Vegetation aufgenommen worden und hat zur Bildung von selenführenden Pflanzen geführt. Diese giftigen Pflanzen haben nun den pflanzenfressenden Sauriern als Nahrung gedient und haben dann ihr Aussterben bedingt.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 2, S. 80*



# REZENSIONEN

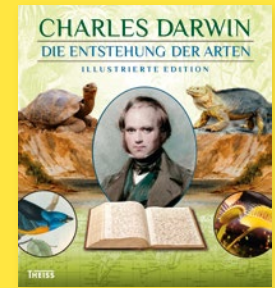
## WISSENSCHAFTS- GESCHICHTE DARWINS JAHR- HUNDERTWERK

Wie großartig das berühmte Buch des Begründers der Evolutionstheorie ist, kann nur ermessen, wer es selbst gelesen hat.

Ja, das ist das Buch, von dem alle gehört, das aber wohl nur wenige gelesen haben: Charles Darwins »Über die Entstehung der Arten« (On the Origin of Species). Es liegt jetzt neu aufbereitet in adaptierter deutscher Übersetzung vor – illustriert mit wunderbaren Fotos und Abbildungen aus Darwins Werken, mit Gemälden und

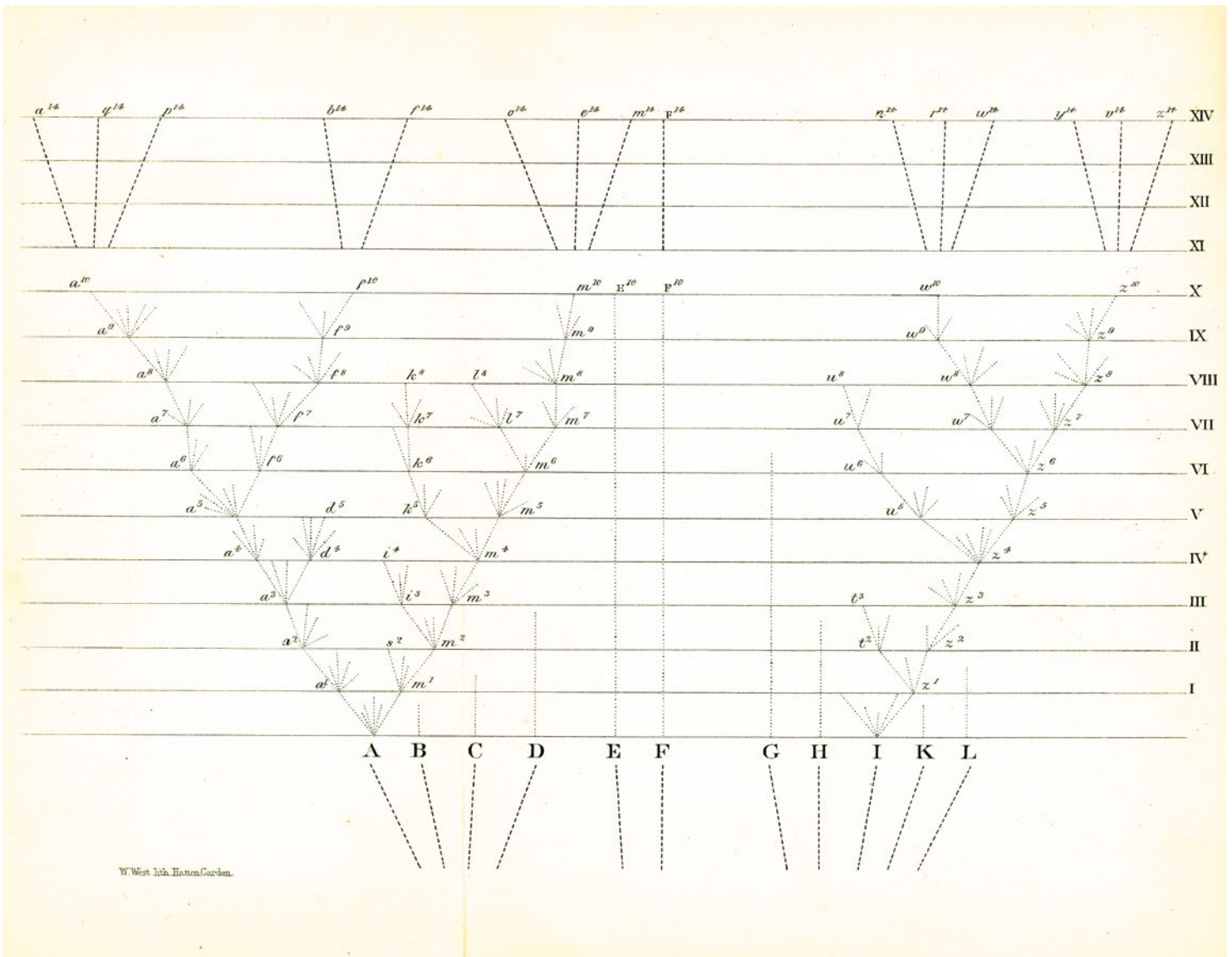
historischen Karikaturen. Auszüge aus seiner Autobiografie, seinen Reisebeschreibungen und Briefen gesellen sich hinzu. Heraus kommt ein mächtiger Band, der seine Leser fordert, aber großartige Lektüre bietet.

Es erstaunt ein wenig, dass der Verlag die Übersetzung Heinrich Georg Bronns von 1860 herange-



Charles Darwin  
**DIE ENTSTEHUNG DER ARTEN**  
Illustrierte Edition  
Theiss, Darmstadt 2017  
562 S., € 49,95 Euro

Anhand dieses Bilds erläuterte Darwin den Artenwandel. A bis L stehen für verschiedene Spezies und die römischen Zahlen für Nachfolgegenerationen, zwischen denen jeweils ihrerseits tausende Generationen liegen. Die Arten A und I fächern in mehrere Spezies auf, während F weitgehend unverändert überdauert und die anderen Arten erlöschen.



THE C. WARREN IRVIN, JR., COLLECTION OF CHARLES DARWIN, UNIVERSITY OF SOUTH CAROLINA LIBRARIES, AUS DARWIN: DIE ENTSTEHUNG DER ARTEN; MIT FRDL. GEN. DES THEISS-VERLAGS, DARMSTADT

zogen hat (und leicht modifizierte, um sie an heutige Sprachgewohnheiten anzupassen). Sie ist verschiedentlich kritisiert worden, da sie sich inhaltliche Änderungen herausnahm. Als Standardübersetzung dient meist die von Julius Victor Carus (1876).

In einer schönen Einführung umreißt Wissenschaftsautor David Quammen die Geschichte hinter dem berühmten Buch. Als 16-Jähriger beginnt Darwin ein Medizinstudium. Da es ihn langweilt, bricht er nach zwei Jahren ab und wechselt zur Theologie. 1831 macht er sein Examen darin und geht als Naturforscher an Bord des Vermessungsschiffs »Beagle«. Während der folgenden mehrjährigen Reise reift er zu einem akribischen Wissenschaftler heran. Die Beobachtungen, die er weltweit macht, lassen ihn schon bald vermuten, dass die Arten veränderlich sind.

## Darwin zögerte Jahrzehntlang, seine Theorie zu veröffentlichen

Zurück in England führt Darwin Notizbücher zur »Transmutation« der Arten. Er liest, sichtet Proben, experimentiert, korrespondiert. 1838 umreißt er erstmals das Prinzip der Evolution, veröffentlicht es aber nicht. 19 weitere Jahre vergehen, in denen er Material sammelt, seine Cousine Emma Wedgwood heiratet, mit ihr aufs Land zieht, zehn Kinder mit ihr bekommt, seine Beagle-Bände herausbringt und über Rankenfußkrebse forscht (für diese Arbeiten

erhält er die Royal Medal). Er schreibt mehrere Entwürfe der Artentheorie, stopft sie aber in die Ablage. 1857 beginnt er ein »großes Buch« über Arten. Als er eine Viertelmillion Wörter hat, erreicht ihn ein Manuskript des Naturforschers Alfred Russel Wallace, in dem dieser eine ganz ähnliche Evolutionstheorie entwirft. Kurz darauf bekommen beide die Urheberschaft an der Idee zugesprochen. Darwin beginnt neu zu schreiben, diesmal vergleichsweise knapp und schnell. 1859 legt er die »Entstehung« vor; die erste Auflage ist am Tag des Erscheinens vergriffen. Fünf weitere Auflagen folgen noch zu Darwins Lebzeiten.

Bronns Übersetzung ist für heutige Lesegewohnheiten ziemlich anstrengend, da im umständlich weitschweifigen Stil des 19. Jahrhunderts formuliert: »Weit nötiger ist es aber,

noch im Gedächtnis zu behalten, dass es viele noch unbekannte Wechselbeziehungen des Wachstums gibt, welche, wenn ein Teil der Organisation durch Variation modifiziert und wenn diese Modifikationen durch natürliche Züchtung zum Besten des organischen Wesens gehäuft werden, dann wieder andere Modifikationen oft von der unerwartetsten Art veranlassen.« Es kostet Mühe, dem hunderte Seiten lang zu folgen, aber es lohnt sich. Denn inhaltlich

ist das Buch überaus beeindruckend.

Im Fokus des Werks steht die Zucht von Pflanzen und Tieren. Darwins zentrales Argument: Wenn der Mensch Tier- und Pflanzenrassen züchten kann, die so stark von Wildformen abweichen, wie sehr muss dann erst die Natur die Arten abändern können, die dafür viel mehr Zeit hat? Ein Züchter wählt Individuen aus, die das gewünschte Merkmal etwas stärker ausprägen als andere, und indem er bevorzugt sie vermehrt, bringt er Nachkommen mit noch größerer Abänderung hervor – er verstärkt anfänglich kleine Unterschiede über Generationen hinweg, bis sie zu großen geworden sind. In der Natur, so Darwin, gehe das ähnlich vonstatten (»natürliche Zuchtwahl«).

Darwin war selbst Taubenzüchter und daher auch praktisch mit dem Thema vertraut. In seinem Buch erörtert er überwältigend viele Befunde aus der Pflanzen- und Tierzucht und vergleicht sie mit Beobachtungen an Wildformen. Auf hunderten Seiten führt er Untersuchungen, Korrespondenzen und Literaturverweise an, und doch jammert er, nicht genug Raum zu haben, um sein gesamtes Material vorzulegen.

Es ist kaum zu glauben, was Darwin in dem Werk alles behandelt: Artenwandel durch Domestikation und in der Natur; Kreuzung und Bastardbildung; natürliche Instinkte; geologische Überlieferung und Fossilien; geografische Verbreitung der Arten; Morphologie und Entwicklungsbiologie und so weiter. Ausführlich

befasst er sich mit Einwänden gegen seine Theorie, entkräftet sie oft, weist aber auch auf Lücken in seinem Gedankengebäude hin. Mit jeder Seite wird deutlicher, wie haltlos die Annahme ist, die Arten seien in eigenständigen Schöpfungsakten erschaffen worden – und wie unvergleichlich viel plausibler die These, dass die Arten abändern, auffächern und der natürlichen Selektion unterliegen.

Ein gelungenes Gegengewicht zum anspruchsvollen Haupttext bieten die eingestreuten Auszüge aus Darwins Autobiografie, seinen weltweiten Briefwechseln mit Freunden und Kritikern und seinen Reisebeschreibungen. In den Beagle-Berichten erzählt der Naturforscher lebendig und spannend von seinen Erlebnissen: wie er mit Gauchos durch Südamerika ritt, mit Feuerländern in Kontakt kam und natürlich immer wieder, wie sehr ihn die fremde Pflanzen- und Tierwelt faszinierte. Er zeigt sich hier nicht nur als Wissenschaftler, sondern auch als begeisterter Jäger, Abenteurer und mitunter sehr witziger Erzähler. Die vielen stimmigen, oft großformatigen Bilder sind passend ausgewählt, schön anzusehen und bieten dem Auge viel Abwechslung – auch wenn die Bildunterschriften vereinzelt nicht ganz geglückt sind.

Alles in allem ein grandios aufbereiteter Band mit wundervollen Illustrationen, und nicht nur für geschichtlich Interessierte lesenswert.

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



## KARTOGRAFIE ZEITGESCHICHTE AUF EINEN BLICK

**Auf 50 Weltkarten enthüllt dieses Werk, was in unserer Zeit geschieht und wie wir den Globus prägen.**

► Über welche Ländergrenzen hinweg laufen die meisten Tweets? Wo liegen Gegenden, auf die niemand Anspruch erhebt? Welche Bevölkerung konsumiert am wenigsten Zucker? In welchem Land gibt es die meisten Religionen, und wo ist das Meer noch unerforscht? Solche und ähnliche Fragen – insgesamt 50 – beantwortet



Alastair Bonnett  
**ATLAS UNSERER ZEIT**  
50 Karten eines sich rasant verändernden Planeten  
DuMont, Köln 2017  
224 S., € 29,-

der Autor und Geograf Alastair Bonnett in seinem Buch. Hierfür präsentiert er jeweils eine großformatige, doppelseitige Weltkarte mit zwei zugehörigen Seiten Text. Wer den Bildband einmal aufgeschlagen hat,

kann sich nicht mehr davon losreißen, immer weiter zu blättern und Neues zu entdecken.

Das Spektrum der behandelten Themen ist sehr breit und reicht vom weltweiten Handel mit Nüssen über den regionalen Zuckerkonsum bis hin zur Dichte der Waffen in Privatbesitz. Vergleicht man die letzte mit der regionalen Häufigkeit von Adipositas (Fettleibigkeit), stellt man sogar fest, dass beide Verteilungen ähnlich sind. Auf solche Zusammenhänge stößt man beim Hin- und Herblättern immer wieder, auch wenn das Buch sie nicht explizit benennt. So sind die Menschen in

Norwegen zwar am glücklichsten, aber sie gehören zugleich zu denen, die den größten ökologischen Fußabdruck erzeugen.

Auch die Karte zum Grad der Friedfertigkeit offenbart einige Überraschungen. So entspricht Südamerika dem verbreiteten Klischee der Gewalttätigkeit überhaupt nicht. Und diverse afrikanische Länder sind ähnlich friedfertig wie die in Westeuropa. Auf einer Detailkarte finden sich die fünf Länder mit den relativ wenigsten Gewalttaten: Island, Dänemark, Österreich und Portugal.

Lobenswert ist, dass der Autor angibt, woher die Daten kommen, die den

## PHYSIK KRÄUSELUNGEN DER RAUMZEIT

**Ein Astrophysiker erzählt die Entdeckungsgeschichte der Gravitationswellen und beantwortet viele Fragen zum Thema.**

► »Hut ab und allergrößten Respekt!«, sagt der bekannte Astrophysiker und TV-Moderator Harald Lesch zum Nachweis von Gravitationswellen – eine wissenschaftliche und technische Meisterleistung. Er und acht weitere Forscher kommen in diesem Buch in Interviews persönlich zu Wort: Sie geben einen Einblick in die aktuelle Forschung und schildern, wie die Entdeckung ihre Weltsicht beeinflusst hat.

Andreas Müller, selbst Astrophysiker und Wissenschaftsautor, versteht es, Gravitationswellenforschung in Wort und Bild lebendig werden zu lassen. Was sind Gravitationswellen und wie wirken sie auf Materie – also auch auf uns? Auf welche Weise entstehen sie, wie lassen sie sich messen, und können sie schlank machen? Ist es möglich, Licht zusammenzuquetschen, und wie klingen Schwarze Löcher beim Crash? Um solche und andere Fragen geht es in den zehn Kapiteln des Bands.

Ein angenehm flüssiger und verständlicher Stil zeichnet das Buch aus. Natürlich ist eine Fülle an Fachbegriffen bei dem Thema nicht zu vermeiden, doch sie sind größtenteils gut erklärt – und ein Glossar gibt es auch. In grau hinterlegten Boxen finden die Leser weiterführende Details, Antworten auf spezielle Fragen, mathematische Zusammenhänge und mehr. So bleibt der Haupttext übersichtlich und auch für Leser ohne einschlägiges Studium gut zugänglich.

Anekdoten und witzige Vergleiche lockern das Werk auf. Da kommen auch mal Elektronen oder Sterne ganz persönlich zu Wort, etwa die Supernova kurz nach der Explosion: »Warum fühle ich mich auf einmal so geschüttelt und gerührt?« Farbige Grafiken und Fotos machen das Forschungsgebiet anschaulich, ergänzen den Text sinnvoll und zeigen die ganz eigene Ästhetik der Messgeräte.

Insgesamt bietet das Buch eine gelungene Übersicht zum Thema »Gravitationswellen«, die sich für Leser mit oder ohne naturwissenschaftlichen Hintergrund eignet. Manuela Kuhar



Andreas Müller  
**10 DINGE, DIE SIE ÜBER GRAVITATIONSWELLEN WISSEN WOLLEN**

Von schwächsten Signalen und stärksten Ereignissen  
Springer, Berlin und Heidelberg 2017  
255 S., € 19,99

# REZENSIONEN

Karten zu Grunde liegen, und wie sie aufbereitet wurden. Die meisten Informationen stammen von behördlichen Quellen aus Amerika, die Daten zum regionalen Grad der Glücklichkeit aus dem südasiatischen Königreich Buthan, die zum Zuckerkonsum vom Weltzahnarztverband (World Dental Federation).

Abwechslungsreich gestaltet der Autor die Weltkarten in verschiedenen Projektionen, so dass die jeweiligen Aussagen schnell zu erfassen sind. Etwas anspruchsvoller ist ein »Sehendiagramm«, das die weltweiten Migrationsbewegungen auf einen Blick zeigt. Es lässt unter anderem erkennen, dass kaum Menschen aus Japan oder Honkong auswandern, hingegen sehr viele aus Indien in die Vereinigten Arabischen Emirate hinein oder von Süd- nach Nordamerika. Leider basiert gerade dieser Karte auf etwas alten Zahlen von 2010. Aus anderen Schaubildern geht hervor, wie ungleich Energieressourcen verteilt sind, wo sich Wüsten ausbreiten, die Nacht am hellsten ist oder der Wald wächst.

Die großformatigen Karten sind ein Hingucker und machen globale Zusammenhänge unmittelbar sichtbar. Details bieten die anschließenden Texte. Alles in allem ein optischer wie inhaltlicher Genuss, der dank seiner lehrreichen, knappen und verständlichen Faktenvermittlung sehr empfehlenswert ist.

Die Rezensentin Katja Engel ist promovierte Ingenieurin der Werkstoffwissenschaften und Volontärin bei **Spektrum** der Wissenschaft.

## MATHEMATIK RECHENKUNDE UND AUFKLÄRUNG

**Muss der Matheunterricht sich stärker darauf besinnen, welch gesellschaftlich wichtigen Beitrag das Fach leistet?**

▶ Mit Mathematik zur Freiheit und zum Glück gelangen: Das klingt sehr ambitioniert. Doch eben diesen Anspruch vertritt Rudolf Taschner, weithin bekannter österreichischer Mathematiker und Autor, in seinem neuesten Buch – und verbindet das mit Anregungen, wie sich der Mathematikunterricht in den Schulen verbessern lasse. In Form eines Essays geht der Autor einerseits mathematischen Ideen und ihrer gesellschaftlichen Bedeutung nach, und nimmt andererseits Ziele und Praxis des Mathematikunterrichts kritisch unter die Lupe.

Ob Steinzeit, Antike oder Mittelalter: Taschner ist davon überzeugt, dass Zahlen schon immer Macht und Besitz verkündeten.

## Auch in Zeiten der Digitalisierung sollte man Berechnungen nachvollziehen und hinterfragen, ob sie plausibel sind

Vorgeschichtliche Medizinmänner hätten vor einem drohenden Kampf mit verfeindeten Stämmen so genannte Kerbhölzer zur Hand genommen, in die sie für jeden Krieger eines Stammes eine Kerbe schnitzten. Indem sie die



Hölzer des eigenen und der gegnerischen Stämme miteinander verglichen, hätten sie entscheiden können, ob sich ein Kampf lohne oder nicht. In diesem Vergleichen lägen die Ursprünge der späteren Grundrechenarten oder auch des Konzepts von Haben und Soll im kaufmännischen Rechnungswesen.

Bis ins Mittelalter, schreibt Taschner, sei es nur wenigen vorbehalten gewesen, wirklich rechnen zu können. Hatte ein Bauer 17 Säcke mit je 23 Pfund Weizen und wollte die Gesamtmenge wissen, so war er kaum in der Lage,

die entsprechende Multiplikation 17 mal 23 (damals XVII mal XXIII) selbst durchzuführen. Stattdessen habe er einen Rechenmeister aufsuchen müssen, der das Ergebnis gegen Entgelt nach einem geheimen Verfahren ermittelte. Erst

Rechenmeister Adam Ries (1492–1559), der die Grundoperationen, unser heutiges Stellenwertsystem (statt des römischen Systems) und den Dreisatz allgemein verständlich und in deutscher Sprache unter das Volk brachte, habe dazu beigetragen, diese Fesseln der Abhängigkeit zu lösen und das selbstständige Denken zu stärken.

In diesem Sinn, so der Autor, trägt Mathematik zur Freiheit bei. Auch wer heute frei sein wolle, dürfe sich weder dem Taschenrechner noch anderen digitalen Geräten und Programmen (und ihren Erfindern) unterwerfen. Das heiße aber nicht, dass man diese Geräte nicht gebrauchen solle, sondern dass man nachvollziehen und überprüfen solle, wie Ergebnisse von Rechnungen zu Stande kommen und ob sie plausibel sind. Bei der obigen Rechnung könnte man zum Beispiel 17 auf- und 23 abrunden auf jeweils 20. Dann wäre 20 mal 20 gleich 400 eine brauchbare Näherung für das tatsächliche Ergebnis 391.

Laut Taschner soll der Mathematikunterricht auf drei Säulen ruhen. Erstens auf praxisrelevanten Grundfertigkeiten, die alle benötigen, um sich in der modernen Welt zurechtzufinden. Dazu gehören Überschlagsrechnungen; das Verstehen (und nicht nur Automatisieren) der Grundoperationen Addieren, Subtrahieren, Multiplizieren und Dividieren; der Umgang mit Brüchen, Verhältnissen, Prozentsätzen und Variablen. Warum gerade diese Dinge so wichtig für Aufklärung und Freiheit sind, erläutert der Autor anhand von



Beispielen aus der Physik oder Finanzwelt. Diese erste Säule dürfe aber nicht überbetont werden – das wäre sonst so, als würde man im Kunstunterricht nur lernen, Zäune zu streichen.

Vielmehr müsse der Unterricht auch die zweite Säule behandeln: Mathematik als Kulturgut. So wie der Musikunterricht vermittelt, große Meisterwerke zu hören, solle der Mathematikunterricht ermöglichen, die Gedanken bedeutender Mathematiker wenigstens ansatzweise nachzuvollziehen, um an den wichtigen Einsichten des Fachs teilzuhaben. Etwa indem er die Grundideen der newtonschen Differenzialrechnung thematisiert und darlegt, wie bedeutsam sie für Gesellschaft und Technik sind (statt Ableiten und Integrieren zu pauken). Die dritte Säule schließlich solle darin bestehen, Begabten »das Tor zu dieser Wissenschaft so weit (zu) öffnen, dass sie nicht nur, wie alle anderen auch, hineinblicken, sondern sogar hindurch schreiten können«.

Taschners Buch ist in gewissem Sinn der ersten und zweiten Säule verpflichtet. Der Autor bespricht lediglich die elementaren mathematischen Konzepte genauer. Wo es darüber hinausgeht, etwa bei der Differenzialrechnung, skizziert er die Ideen nur grob. Dafür bettet er sie in spannende Erzählungen ein. So nimmt er auch mathematisch oder historisch weniger vorgebildete Leser mit. Fortgeschrittene könnten sich an den teils recht vereinfachten und spekulativen historischen Darstellungen stören und werden wohl auch fachlich

wenig Neues erfahren. Taschners Kritik an ausgewählten Aufgaben der Pisa-2000-Studie ist gut begründet und nachvollziehbar, lässt allerdings einen Aktualitätsbezug vermissen.

Mathematik auch als Kulturgut zu thematisieren und ihre Rolle im Zuge der Digitalisierung kritisch zu analysieren, sind wichtige Impulse für den Mathematikunterricht der Zukunft. Leider lässt Taschner aber den Eindruck entstehen, der Lehrplan sei hinsichtlich der ersten Säule mit überflüssigen Inhalten überfrachtet, die zu Gunsten der zweiten Säule gekürzt werden müssten. Damit geht er auf Stimmenfang bei Lesern, die Probleme im Matheunterricht hatten und dies darauf schieben, dass von ihnen zu viel verlangt worden sei. Tatsächlich aber entsprechen bereits die heutigen Lehrpläne überwiegend Taschners Forderung bezüglich der ersten Säule. Die These, in höheren Klassen auf das Umformen von Gleichungen oder Differenzial-/Integralrechnung verzichten zu können, ist gewagt, gerade wenn die Hochschulreife das Ziel darstellt. Denn heute kommt man in zahlreichen Studiengängen um diesen Stoff nicht mehr herum.

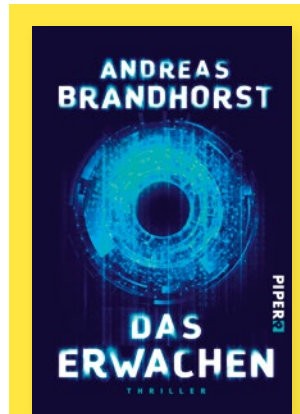
Auch anderswo greifen die Argumente des Autors mit Blick auf die Bildungspolitik sehr kurz. Er betrachtet nicht differenziert genug, was zu den Fertigkeiten der ersten Säule gehört, ob man diese in vergleichenden Tests abbilden kann oder ob ein – auch nur ansatzweises – Verstehen mathematischer

Konzepte ohne weitere Voraussetzungen möglich ist. Unterm Strich also ein Werk, dem man nicht vorbehaltlos zustimmen kann.

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

## BELLETRISTIK TECHNIK AUSSER KONTROLLE

**Mit fiktiver Handlung, aber auf realer Grundlage schildert ein Sciencefiction-Autor die Gefahren eines maschinellen Bewusstseins.**



Andreas Brandhorst  
**DAS ERWACHEN**  
Thriller  
Piper, München 2017  
736 S., € 16,99

► Können Maschinen intelligenter werden als Menschen? Können sie ihnen die Herrschaft über die Welt streitig machen? Was wäre, wenn eine global vernetzte Maschinenintelligenz erwacht? Hätte die Menschheit noch eine Zukunft – und wenn ja,

in welcher Rolle? Um diese Fragen kreist der neue Thriller des Sciencefiction-Autors Andreas Brandhorst. Sein Szenario spielt in naher Zukunft: Die Digitalisierung ist vorangeschritten, das Internet der Dinge für Industrie und Privathaushalte selbstverständlich, ebenso wie selbstfahrende Elektroautos, elektrische Sicherheitsschlösser und weitgehende Kameraüberwachung.

In dieser Welt setzt der Hacker Axel Krohn versehentlich einen Computervirus frei, der innerhalb kürzester Zeit nahezu alle Prozessoren der Welt miteinander verknüpft. Der evolutionäre Algorithmus des Virus verbessert sich selbst. So entsteht ein künstliches Gehirn mit Computerchips als Neuronen, die über das Internet durch unzählige Synapsen miteinander verbunden sind. Und in diesem Gehirn erwacht ein Bewusstsein.

Obwohl das Thema komplex ist und einige Fachbegriffe nur computeraffinen Lesern geläufig sein dürften, schafft es Brandhorst von Anfang an, Spannung aufzubauen. Formale Details helfen dabei: Die Nummerierung der ersten Kapitel ist ein Countdown, beginnend bei minus neun. So wird dem Leser immer wieder bewusst, dass das Erwachen unvermeidlich ist und kurz bevorsteht.

Schon in diesen ersten Abschnitten schildert Brandhorst, wie globale Stromausfälle zu Chaos führen: Moderne Kommunikationsmittel funktionieren nicht mehr, Verkehrsleitsysteme fallen aus, die Geldautomaten geben keine Scheine heraus, Menschen bleiben

hinter ihren elektronisch gesicherten Türen eingeschlossen, und die Trinkwasserversorgung kollabiert, da kein Druck mehr auf den Leitungen ist. Bricht ein Brand aus, kann die Feuerwehr nicht mehr löschen, und die medizinische Versorgung muss auf ein Minimum reduziert werden.

Auch wenn die Digitalisierung in Brandhorsts Thriller bereits weiter fortgeschritten ist als in unserer Welt, machen die

für real hält. Seinem Buch vorangestellt hat er Zitate unter anderem von Physiker Stephen Hawking, Apple-Mitgründer Steve Wozniak, Google-Entwickler Sergey Brin und Silicon-Valley-Investor Elon Musk. Sie alle warnen vor den Gefahren künstlicher Intelligenz (KI). Die Ergebnisse seiner eigenen umfangreichen Recherchen lässt Brandhorst von Computerexperten aussprechen, die er in die Handlung einwebt. Sie erklären

## Ab einem gewissen Punkt, dem Take-off, wächst das Wissen einer Maschinenintelligenz exponentiell und unaufhaltbar

Schilderungen doch deutlich, wie abhängig wir bereits heute von Elektrizität, Mobilfunk und Internet sind. Ist es sinnvoll, auf diesem Weg immer weiter zu gehen, nur weil es praktisch und bequem ist? Ließe sich die Entwicklung überhaupt aufhalten? Diese Fragen tauchen immer wieder implizit auf. Doch obwohl die Handlung auf Schreckensszenarien fußt, die der technologische Fortschritt verursachen könnte, ist das Werk keinesfalls wissenschaftsfeindlich. Vielmehr gewinnt man beim Lesen die Ansicht, dass Wissenschaft und technologischer Fortschritt wichtig sind, um die menschliche Zivilisation zu erhalten und zu fördern. Allerdings müssen sie aufmerksam und kritisch begleitet werden.

Brandhorst lässt keinen Zweifel daran, dass er die beschriebenen Gefahren

den Charakteren den Unterschied zwischen KIs, wie wir sie schon heute kennen, und einer Maschinenintelligenz: Während Erstere auf ein begrenztes Spezialgebiet festgelegt sind, ist eine Maschinenintelligenz dem Menschen in jeder Hinsicht überlegen, lernt und verbessert sich selbst. Ab einem gewissen Punkt, dem Take-off, wächst ihr Wissen exponentiell und unaufhaltbar.

Diesen Take-off versuchen die Charaktere im Buch zu verhindern. Kann es gelingen, dass sich alle Mächtigen der Welt verbünden, um die Menschheit zu retten? Ist es vertretbar, Menschenleben zu opfern, um die Maschinenintelligenz zu besiegen? Und wäre die Welt eine schlechtere, würde sie nicht mehr von Menschen bestimmt? Zwischen Verfolgungsjagden und politischen Ränkespielen tau-

chen solche philosophischen Fragen immer wieder auf und regen die Leser dazu an, sich eigene Gedanken zu machen.

Nachdem Brandhorst die Handlung lange und gekonnt auf das Finale zugespitzt hat, kommt das Ende etwas plötzlich und im Vergleich zur gut durchdachten und in sich logischen Handlung ein wenig simpel daher. Dennoch ist das Buch äußerst lesenswert. Auf mehr als 700 Seiten bietet es Spannung, Informationen und Denkanstöße. Wie realistisch das Szenario tatsächlich ist, darüber dürften Expertenmeinungen auseinandergehen. Interessierte Leser können sich durch zusätzliche Recherchen ein eigenes Bild machen. Einige Literaturempfehlungen finden sich im Nachwort.

Die Rezensentin Elena Bernard ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

## ASTRONOMIE OPULENTE REISE DURCHS SONNENSYSTEM

Ein Bildband über  
Planeten, Monde  
und Kleinkörper.

► Schon seit Längerem ist im deutschsprachigen Raum kein Buch mehr erschienen, das den derzeitigen Kenntnisstand über das Sonnensystem und die Objekte darin leicht verständlich und visuell ansprechend präsentiert. Diese Lücke füllt nun Thorsten Dambeck, Physiker und Wissenschaftsjournalist aus Weinheim. Sein großformatiges,



Thorsten Dambeck  
**PLANETENWELTEN**

In den Tiefen  
des Sonnensystems  
Kosmos, Stuttgart 2017  
224 S., € 39,90

224 Seiten umfassendes Werk ist reich illustriert und besticht durch sehr gute Druckqualität, bei der auch feine Details gut zu erkennen sind.

Der Schwerpunkt des Bands liegt auf den Bildern, wobei es dem Autor gelungen ist, viele selten gesehene Aufnahmen zu finden. Wegen der unglaublich großen Bildausbeute diverser Raumsonden-Missionen zu Planeten und Kleinkörpern konnte der Autor aus einem reichen Fundus schöpfen. Dies gilt insbesondere für die europäische Mission Rosetta zum Kometen Tschurjumow-Gerasimenko und für die kürzlich beendete Erkundung des Saturns durch die Raumsonde Cassini. Letztere lieferte in 13 Jahren Umlauf um den Planeten rund eine halbe Million Bilder vom Planeten selbst sowie von seinen Ringen und Monden. Ähnliches gilt für den Zwergplaneten Pluto, von dem bis 2015 (der Passage durch die US-Raumsonde New Horizons) nur schlechte Bilder existierten, die wenig mehr als eine ver-



schwommene Scheibe enthielten.

Das Buch gliedert sich in sechs größere Abschnitte. »Der Tagesstern« widmet sich unserer Sonne, während »Gesteinsplaneten« die Welten Merkur, Venus, Erde/Mond und Mars beschreibt. Im Abschnitt »Kleinkörper« bespricht der Autor die Asteroiden und Kometen, wobei die enorme Vermehrung des Wissens in den zurückliegenden Jahren deutlich wird. In »Gasplaneten« geht es vor allem um Jupiter und Saturn; besonders erfreulich ist hier, dass auch topaktuelle Bilder der Jupitersonde Juno noch Eingang ins Buch fanden. Juno ist ein Raumflugkörper der NASA und Mitte 2016 in eine Umlaufbahn

jenseits der Neptunbahn gibt es keine detaillierten Ansichten. Der Abschnitt »Planetenforschung« schließt das Werk ab, indem er Grundlagen über die Erkundung des Sonnensystems mit Raumsonden behandelt. Außerdem stellt der Autor einige besonders interessante Exoplaneten vor, von denen man inzwischen mehr als 3700 kennt.

Die Texte in dem Band sind durchweg knapp gehalten – das gilt sowohl für die einleitenden Texte, die sich selten über mehr als vier Seiten ziehen, als auch für die Bildlegenden, die aber dennoch viele wissenswerte Details enthalten. Als visueller Zugang zum spannenden Thema Planetenforschung überzeugt das Werk. Vermisst

## Topaktuelle Bilder der Sonde Juno, die seit Mitte 2016 um den Jupiter kreist, fanden noch Eingang ins Buch

um den Gasplaneten eingeschwenkt. Uranus und Neptun hingegen handelt Dambeck recht knapp ab – hier hat sich aber seit den Vorbeiflügen der US-Raumsonde Voyager 2 in den 1980er Jahren auch nur vergleichsweise wenig getan. Dies liegt vor allem daran, dass Uranus und Neptun sehr weit von der Erde entfernt und daher nur mit großem finanziellem und zeitlichem Aufwand erreichbar sind.

Das fünfte Kapitel »Ferne Eiswelten« legt seinen Schwerpunkt auf die fantastischen Bilder von Pluto und seinen fünf Monden; von den anderen Objekten

habe ich eine Tabelle, die alle acht großen Planeten und ihre Eigenschaften auflistet und die es den Lesern erlaubt hätte, die Himmelskörper direkt miteinander zu vergleichen.

»Planetenwelten« eignet sich mit seinen leicht verständlichen Texten vor allem für Einsteiger. Mit rund 40 Euro bietet das Werk ein sehr gutes Preis-Leistungs-Verhältnis. Vielleicht regt es den einen oder anderen Leser dazu an, sich noch intensiver mit der faszinierenden Materie zu befassen.

Der Rezensent Tilmann Althaus ist Redakteur bei »Sterne und Weltraum«.

## GESELLSCHAFT ZIEL UNBEKANNT

**Wissenschaftsjournalist Ranga Yogeshwar blickt in diesem Buch in die Zukunft – gekonnt erzählt, aber mit analytischen Unschärfen.**

► In Zeiten allgemeiner Verunsicherung und Zukunftsangst platziert

Ranga Yogeshwar sein neues Werk »Nächste Ausfahrt Zukunft« genau richtig. Der Wissenschaftsjournalist, dem geneigten Leser aus diversen TV-Sendungen bekannt, entfaltet in seinem Buch ein Panorama der Zukunftsthemen: künstliche Intelligenz, Robotik, Digitalisierung, (Total-)Überwachung, Stimmbiometrie. Mittels didaktischer Reduktion und griffiger Formulierungen bringt er komplexe Themen den Lesern gekonnt nahe. Die deterministische Funktionslogik von Algorithmen auf Partnerbörsen bringt er beispielsweise so auf den Punkt: »/f Partner geeignet, then abspeichern, else löschen.«

Yogeshwar kann aus einem reichen Fundus von Erfahrungen schöpfen. Er berichtet von Forschungsreisen in die Atomruine von Fukushima, dem Besuch eines Klonlabors in Südkorea sowie einem Überwachungsselbstexperiment. Fast schon im Plauderton erzählt er, wie eine Kyronik-Firma im amerikanischen Scottsdale menschliche Körper in Stickstofftanks bei minus 296 Grad Fahrenheit lagert, um sie eines Tages wieder aufzutauen und zum Leben zu erwecken. Es sind zu-

weilen verstörende Zeugnisse einer futuristischen Welt. Wie in seinen Fernsendsendungen erklärt Yogeshwar plastisch, nimmt sein Publikum an die Hand und zeigt die Chancen und Risiken der Technologie auf. Und er stellt die richtigen Fragen: Mensch und Maschine – wer programmiert wen? Werden uns Roboter kontrollieren? Was bleibt vom Menschen? Löst sich die Privatsphäre auf?

Die Antworten des Autors vermögen jedoch nicht immer zu überzeugen. Zwar wartet Yogeshwar im Schirmmacher-Duktus – dem verstorbenen »FAZ«-Herausgeber ist das Buch gewidmet – mit guten Diagnosen auf. Etwa: »Das Unteilbare des Menschen zerfällt in dieser Logik zu einer Ansammlung messbarer Größen.« Doch bewegt er sich oft entlang bekannter Argumentationslinien. Dass die Dauererreichbarkeit durch Smart-



phones die Grenze zwischen Arbeit und Freizeit auflöst, ist ein Alltagsplatz. Auch die Tatsache, dass wir nicht etwa mehr Bücher lesen, sondern vielmehr digitale Lesegeräte den Konsumenten (aus)lesen, wird schon lange debattiert. Manche Überlegungen Yogeshwars, etwa ob Algorithmen und vernetzte Computer dereinst die Macht über die Menschheit übernehmen («Singularität»), sind nicht viel mehr als Geraune, was der analytischen Schärfe zuweilen etwas abträglich ist. An einigen Stellen, etwa zur Selfie-Kultur, schwingt zudem ein latenter Kulturpessimismus mit. Gut gemeinte Forderungen à la »Unser Bewusstsein muss sich ändern« oder »Wir sollten keine Angst vor dem Morgen haben« klingen recht floskelhaft und abgedroschen.

Ein Zitat des genialen Mathematikers Alan Turing aus dessen Aufsatz »Können Maschinen denken?« (1950) übersetzt Yogeshwar mit »Wir können hoffen, dass Maschinen schließlich mit Männern in allen rein intellektuellen Feldern konkurrieren werden« und mokiert sich im darauf folgenden Satz über die unzeitgemäße Verwendung des Wortes »Männer«. Dass das englische »men« auch »Menschen« bedeuten kann, ist offenbar selbst dem Lektor nicht aufgefallen. Dieser Lapsus (wie auch der Übersetzungsfehler von Googles altem Wahlspruch »Don't be evil«) wäre verzeihlich, würde Yogeshwar nicht in dozierendem, zuweilen beherrschendem Ton schreiben.

Den durchaus spannenden Überwachungsselbstversuch, bereits im Oktober 2013 im Feuilleton der »FAZ« beschrieben, verkauft Yogeshwar als bahnbrechendes Experiment, obwohl Überwachung inzwischen unter ganz anderen Vorzeichen stattfindet. Millionen Menschen rüsten ihr als »Smart Home« deklariertes Zuhause mit Mikrofonden und Kameras zum Big-Brother-Container aus. Der Netzwerklautsprecher Amazon Echo steht mittlerweile in jedem zehnten US-Haushalt. Das hat keinen experimentellen Charakter mehr, sondern bereits einen handfesten wirtschaftlichen. An dieser Stelle hätte man sich eine kritische Reflexion des Konsums der Überwachung gewünscht – darüber, warum Bürger sich freiwillig zu Komplizen des Erkennungsdienstes machen.

Der Rezensent Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg und ist Autor der Kolumne »Lobes Digitalfabrik« auf »Spektrum.de«.

## PHILOSOPHIE SCHWIERIGE MORALISCHE URTEILE

**Darf man Menschen umbringen, um andere Tötungen zu verhindern? Philosoph Thomas Zoglauer stellt verschiedene ethische Positionen vor.**

▶ Ist der Luftwaffenmajor Lars Koch des mehrfachen Mordes schuldig, weil er ein von Terroristen entführtes Flugzeug abschießen lässt, das droht,

in die Münchner Allianz-Arena zu stürzen? Die fiktive Gerichtsverhandlung des Films »Terror – Ihr Urteil« von Ferdinand von Schirach löste eine Kontroverse um moralische Urteile über Leben und Tod aus. Sprachen rund zwei Drittel (66 Prozent) der Zuschauer in den Vereinigten Staaten den Major frei, waren es in Deutschland nur noch 61 Prozent, und in Japan plädierte sogar eine Mehrheit für die Verurteilung (63 Prozent). Zu derlei Fragen kann man sehr verschiedene Positionen einnehmen, die jeweils gut begründbar sind – das macht es so schwer, sich hierüber zu einigen.

Thomas Zoglauer, außerplanmäßiger Professor für Philosophie an der BTU Cottbus, legt mit diesem Buch einen schönen Einführungsband vor, der sich solchen Problemen widmet. Der Autor orientiert sich nicht am typischen Aufbau entsprechender Werke, die häufig nach ethischen Schulen gegliedert sind,

sondern stellt exemplarisch neun Dilemmata vor, die im Zweifel eine Entscheidung über Menschenleben nötig machen. Anhand dieser bespricht er verschiedene ethische Positionen. Seine Beispiele decken ein sehr breites Spektrum ab, indem sie sich von Folter über Kannibalismus und Gentechnik bis zu selbstfahrenden Autos erstrecken. Dadurch gelingt ihm zweierlei: Eine lebendige Darstellung und eine nachvollziehbare Unterscheidung der maßgeblichen ethischen Schulen. Ein weiteres Kapitel erörtert den allgemeinen Umgang mit ethischen Normenkonflikten, ohne sich auf ein konkretes Beispiel zu beziehen, und überzeugt ebenfalls durch gute Verständlichkeit.

Einziges Wermutstropfen des Bands ist die spürbare leichte Befangenheit des Autors, der selbst dem deontologischen Lager angehört – also die Beweggründe einer Handlung ins Urteil einbezieht. Utilitaristische Positionen, die den Fokus auf die Konsequenzen der Handlung legen, stellt Zoglauer oft von vornherein als schwächer dar, was in einem Einführungsband etwas fehl am Platz erscheint.

Das Werk überzeugt mit klarem Stil, der sich besonders für Laien eignet und für solche, die allgemein an praktischer Philosophie interessiert sind. Der Band demonstriert auf gelungene Weise, dass die Philosophie eine große Alltagsrelevanz hat und weiterhin haben wird.

Der Rezensent Maxime Pasker ist Literaturwissenschaftler und Philosoph in Heidelberg.





## UNNÖTIGE PANIKMACHE

**Drei US-Experten für biologische und chemische Waffen bewerteten einen Unfall mit Anthraxbakterien in einem sowjetischen Militärlabor neu** (»Die Milzbrandbedrohung«, *Spektrum* Dezember 2017, S. 38).

**Florian Buth, per E-Mail:** Mit Freude und Gewinn lese ich seit Jahren Ihre Hefte – und bin stets vor Monatsende ohne Lesestoff. Leider steht der Artikel meines Erachtens nicht in der beeindruckenden Reihe der anderen. Zum einen ist die deutliche Kritik an Russland sehr einseitig: Ich traue vielen Ländern zu, biologische Waffen entweder zu besitzen oder so viel Knowhow, Infrastruktur und Mittel zu haben, dass sie in der Lage sind, eine industrielle Produktion von Biowaffen in nur wenigen Wochen oder Monaten hochzuziehen. Zum anderen zeigt der Artikel keine Lösungen auf, sondern ist mit seinem Schluss »Darauf dürften viele Länder auf der Erde schlecht vorbereitet sein« fast schon Panikmache.

Und das unnötigerweise! Führen wir den Gedanken mal zu Ende: Ein Staat setzt Biowaffen im großen Maßstab ein, Millionen sterben, vieles ist großflächig verseucht. Wie würde das betroffene Land (oder wie würden die beschützenden Mächte) reagieren? Mit einem Atomschlag. Das würde in einen dritten Weltkrieg ausarten. Deswegen wird kein Land seine Biowaffen einsetzen – was ein großes Glück ist, denn effektiver Schutz gegen sie ist kaum möglich. Die Essenz: Biowaffen würden wie Atombomben wirken, deshalb erzeugt ihre (Nicht)anwesenheit keine



DR. MICHELLE / GETTY IMAGES / ISTOCK

**Milzbrandbakterien bilden widerstandsfähige Sporen.**

großen Änderungen im Weltgefüge. Es wäre schön, wenn Sie in Zukunft solche Gedanken selbst zu Ende führen, statt bei bloßer Panikmache zu verweilen. »Wir wollten nur ein Problem aufzeigen« darf in dieser primitiven Form nicht Ihren Ansprüchen genügen.

## FEIND DER DEMOKRATIE?

**Der Sozialwissenschaftler Walter Quattrociocchi präsentierte statistische Untersuchungen zur Verbreitung von Falschmeldungen im Netz.** (»Fake News« in sozialen Netzwerken«, *Spektrum* November 2017, S. 58).

**Hauke Obersteller, Schneverdingen:** Herr Quattrociocchi zeigt eine demokratiefeindliche Haltung: »Jeder kann Behauptungen zu jeglichem Sachverhalt veröffentlichen, ohne dass eine andere Person oder Autorität zuvor den Wahrheitsgehalt oder wenigstens die faktischen Voraussetzungen überprüft hätten.« Ich kann diese Zeilen nur so ver-

## 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](http://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.

stehen, dass er ein Problem mit Meinungsfreiheit hat. Ein Lösungsansatz, so schreibt er, könnte sein, dass Facebook, Google und Co ihre Algorithmen ändern. Er meint also ernsthaft, nicht demokratisch legitimierte Konzerne könnten die Demokratie schützen.

Übrigens: Die einzige Möglichkeit, friedlich eine Lösung zu finden, also miteinander ins Gespräch zu kommen, schließt er aus, weil (wie Redaktionsleiter Hartwig Hanser im Editorial paraphrasiert) »es fast unmöglich ist, Anhänger von Falschmeldungen und Verschwörungstheorien vom Gegenteil zu überzeugen«.

**Antwort des Redakteurs Christoph Pöppe:** Ich halte die Unterstellung, Quattrociocchi zeige eine demokratiefeindliche Grundhaltung, für abwegig. Es ist an keiner Stelle des Artikels auch nur die Spur einer Sympathie für eine Lenkung der Medien nach, sagen wir, chinesischem Vorbild zu erkennen. Es geht nicht darum, an der Freiheit der Meinungsäußerung zu rütteln. Allerdings kann der Empfänger dieser Äußerungen nur dann den richtigen Gebrauch von ihnen machen, wenn er deren Glaubwürdigkeit wenigstens ungefähr einschätzen kann. (»Richtig« heißt hier sowohl, dass der Gebrauch der Nachricht der Wahrheitsfindung dient – was im Einzelfall schwer zu beurteilen sein mag –, als auch, dass die Nachricht für den Empfänger selbst nach dessen Maßstäben einen Wert hat.) Es ist diese Fähigkeit, die durch das Internet und vor allem die sozialen Medien bedroht ist. Hinzu kommt, dass Letztere durch die Auswahl ihrer Meldungen dem Empfänger de facto solche vorenthalten, die sein Weltbild erschüttern könnten und damit sogar seine Meinungsfreiheit beeinträchtigen. Auch ich glaube, dass nicht demokratisch legitimierte Konzerne der Demokratie aufhelfen können. Und zwar, indem sie aufhören, ihre Kunden zu entmündigen.

## SPERMEN ALS RIESENVIREN

**Die Biologen Chantal Abergel und Jean-Michel Claverie erinnerte manches an den relativ neu entdeckten Riesenviren an Zellen** (»Faszinierende Riesenviren«, *Spektrum* September 2017, S. 38).

**Michael Jungnickl, Neunkirchen am Brand:** Die Umbenennung von »Viren« in Virionen löst elegant die Frage, ob Viren anorganisch oder lebendig sind. Sie gehören nun eindeutig zu einer lebenden Zelle. Aber das Modell lässt sich auch auf die zweigeschlechtliche Fortpflanzung anwenden. Demnach sind Spermien auch nur Virionen, die sich erst in Eizellen vermehren können.

# futur III

## Der Eindringling

Begegnung mit einem besonders heimtückischen Computervirus.

Eine Kurzgeschichte von Uwe Hermann

Der Alarm der Rauchmelder weckte mich. Ich brauchte eine Sekunde, bevor ich die Bedeutung des nervtötenden Lärms erfasste. Dann sprang ich aus dem Bett und eilte aus dem Schlafzimmer. Hinter mir richtete sich meine Frau Yvonne verschlafen auf. »Was ist los?«, fragte sie. Ich war bereits an der Tür. »Der Feueralarm!«, rief ich. Dann stand ich schon auf dem Flur. Alles schien in Ordnung. Ich roch weder Rauch noch schlugen mir Flammen oder Hitze entgegen. Stattdessen umgab mich Dunkelheit. Meine Hand tastete sich an der Wand entlang bis zum Lichtschalter und knipste das Licht an.

Yvonne trat in den Flur. Aus dem Kinderzimmer kam unser siebenjähriger Sohn Lukas, sein Kuscheltier fest umklammert, und rannte verängstigt in ihre Arme. Sophie, unsere zwölfjährige Tochter, die sich am Wochenende sonst nie vor zehn Uhr aus dem Bett bequemte, öffnete vom Lärm aufgeschreckt die Tür ihres Zimmers. »Was ist passiert?«

Noch immer quiekte der Feueralarm. »Das ist der Rauchmelder«, antwortete ich.

Sophie schaute sich um. »Brennt's?« Sicher überlegte sie, welches ihrer vielen elektronischen Geräte sie als Erstes retten musste.

Über uns an der Decke blinkte die rote Warnleuchte des Rauchmelders. Dieser war per WLAN mit identischen Geräten in den anderen Zimmern vernetzt. Wurde ein Alarm ausgelöst, gab er ihn an die anderen Geräte weiter. Wir suchten Raum für Raum ab, ohne einen Grund für den Alarm zu finden.

»Fehlalarm«, sagte ich, nachdem wir wieder auf dem Flur standen. Ich holte mir vom Esstisch einen der

Stühle, um die Rauchmelder auszuschalten. Mir fiel auf, dass alle Jalousien heruntergelassen waren. Kein Licht drang von draußen herein.

»Wie spät ist es eigentlich?«

Yvonne warf einen Blick auf die Uhr in der Küche. Sie stutzte. »Keine Ahnung. Die Anzeige steht auf 99:99.«

Ich ging zu einem der Fenster hinüber und drückte auf den elektrischen Schalter der Jalousie. Nichts! Auch als ich einen der anderen Knöpfe betätigte, hoben sich die Rollläden keinen Millimeter. Dafür klingelte es an der Haustür. Wir zuckten zusammen.

»Ich geh schon.« Yvonne holte ihren Morgenmantel aus dem Badezimmer und eilte die Treppe hinunter.

Sophie wollte wieder in ihrem Zimmer verschwinden und fortsetzen, was Jugendlichen so am Wochenende trieben. Ich hielt sie zurück: »Nimm Lukas mit, bis wir wissen, was los ist.«

Sie verdrehte die Augen. Ihr Bruder ebenso. »Muss das sein? Ich bin doch kein Babysitter.«

»Ich brauche auch keinen Babysitter!« Lukas verschränkte beleidigt die Arme. Bevor die Diskussion in einem Streit enden konnte, kehrte meine Frau zurück. Ich sah sofort, dass etwas nicht stimmte. »Was ist los?« Sie schluckte und versuchte ein Lächeln, das ihr völlig misslang.

»Die ... die Tür hat sich nicht geöffnet. Wir sind eingeschlossen.«

Ich runzelte die Stirn. »Was meinst du? Der Computer entriegelt sie doch automatisch. Standest du auch dicht genug vor der Kamera?«

Ihre Augen funkelten zornig. »Glaubst du, ich weiß nicht, wie man eine Tür öffnet? Aber weder die Stimm- noch die Gesichtserkennung hat funktioniert!«

»Und wer hat geklingelt?«

»Keine Ahnung, die Tür hat sich doch nicht geöffnet!« Sie knirschte ärgerlich mit den Zähnen und verlangte mit ihrem Blick, dass ich nachschauen solle. Also ging ich die Treppe hinunter, in der Absicht, die massive Haustür selbst zu öffnen. Yvonne hatte Recht: Auch bei mir blieb die Authentifizierung erfolglos.

Lukas sah mich bange an. »Müssen wir jetzt für immer im Haus bleiben?«

»Glaub nur nicht, dass das ein Grund für dich ist, am Montag nicht zur Schule gehen zu müssen.«

Er schaute enttäuscht. Dann hatte er eine neue Idee. »Darf ich fernsehen?«

»Meinetwegen.« Unser Sohn stürmte sogleich los Richtung Wohnzimmer. Ich zog und drückte am Türgriff, während ich immer wieder in die Kamera schaute und die Haustür aufforderte, sich zu öffnen, doch nichts geschah.

Sophie schaute amüsiert zu, wie ich an der Tür versagte. »Vielleicht hat der Hausrechner einen Kurzschluss? Es ist ja ungewöhnlich, dass so viele Geräte zur gleichen Zeit ausfallen«, sagte sie.

Ich dachte an die Jalousien und an die Zeitanzeige der Küchenuhr. »Könnte sein. Hat es letzte Nacht ein Gewitter gegeben?«

Yvonne zuckte mit den Schultern. »Ich habe nichts gehört. Aber du weißt ja, wenn ich mal schlafe ...«

Lukas tauchte hinter mir auf und zog an meinem Ärmel. »Papa, ich brauche deine Kreditkarte, sonst läuft der Fernseher nicht.«

Wir eilten ins Wohnzimmer. Anstatt eines Senders zeigte der Fernseher einen Text, der verkündete, dass er unter Kontrolle des Intruder-Virus stand und erst nach Eingabe einer



Kreditkartennummer sein Programm fortsetzen würde.

Mein Mund klappte auf. Sophie schaute entsetzt. Nur Yvonne blieb ruhig. Sie ging zum Fernseher hinüber und löste das Problem auf ihre Art: Sie schaltete ihn ab.

»Du kannst ein Buch lesen«, sagte sie zu Lukas. Unser Sohn ließ sich schmollend in einen der Sessel fallen, ohne seinen Büchern in der Spielecke unseres Wohnzimmers auch nur einen Blick zuzuwerfen.

Dann sprang plötzlich das Urlaubsbewässerungssystem auf den Fensterbänken an und berieselte die Blumenkästen.

Ich kratzte mich am Kinn. Mir fiel ein, dass ich noch meinen Schlafanzug trug. »Schauen wir uns den Hausrechner an!«

Gemeinsam verließen wir das Wohnzimmer. Lukas schloss sich uns an. Offensichtlich wollte er nicht mit einem virenverseuchten Fernsehgerät allein bleiben. Der Serverraum befand sich im Keller, doch so weit kamen wir nicht. Auch das elektrische Schloss der Kellertür blockierte.

»Wir könnten am Sicherungskasten den Strom ausschalten. Dann sollte sich die Tür öffnen lassen.«

»Ohne Strom kriegen wir doch die Tresortür des Servers nicht mehr auf«, mischte sich Sophie ein.

»Was verstehst du denn davon, kleine Dame?«, fragte ich, ärgerlich, dass sie meinen Plan anzweifelte.

»Immerhin habe ich Informatik in der Schule.«

»Ich dachte, da erstellt ihr nur Powerpoint-Präsentationen?«

Yvonne stand bereits am Sicherungskasten und legte den Hauptschalter um. Nichts geschah. Dennoch eilten wir zur Haustür, nur um festzustellen, dass sie noch immer verschlossen war. Ich blickte in die ratlosen Gesichter meiner Familie. »Familierrat in der Küche!«, befahl ich.

Unser Kaffeevollautomat war ebenso verseucht wie der Kühlschrank, der laut Display in der Vordertür palettenweise Jogurt bei einem Online-Supermarkt bestellte. Kurz dachte ich daran, meine Kreditkarte zu benutzen, und

überlegte, wie viel Geld mir ein Kaffee wert war.

Sophie kam herein. »Keines unserer Telefone funktioniert noch. Auch die Tablets sind verseucht. Das muss ein systemübergreifender Virus sein, sonst könnte er sich nicht so schnell verbreiten.«

Ich zog den Stecker des Küchenradios, aus dem nur noch klassische Musik dudelte. »Hilft uns diese Erkenntnis irgendwie weiter?«

Sophie schwieg beleidigt.

Yvonne seufzte genervt. »Herrgott, dann benutzen wir eben unsere Kreditkarte. Hauptsache, wir kommen aus dem Haus.«

»Das funktioniert nicht«, erwiderte ich kopfschüttelnd. »Der Intruder-Virus ist Ransomware, ein Erpressungstrojaner. Selbst wenn wir das Lösegeld bezahlen, schalten sich nur die kleineren Systeme wieder ein. Die Haustür oder die Jalousien öffnen sich nicht. Der Hacker wird uns nicht aus dem Haus lassen, bis wir pleite sind.«

»Was machen wir jetzt?«, fragte Sophie.

»Vielleicht können wir eine Jalousie hochschieben?«, schlug Yvonne vor.

Sofort räumten wir die Fensterbank leer. Sophie holte ein Messer aus der Schublade in der Küche und reichte es mir. Ich schob die Klinge zwischen Fensterbank und untere Kante und schaffte es, die Rollläden einen Spalt hochzuschieben. Hastig klemmte ich den Griff des Messers darunter. Von draußen hörte ich ein Geräusch. Durch den Spalt unterhalb der Jalousie sahen wir, wie sich das elektrische Tor der Autogarage öffnete. Die Scheinwerfer unseres autonomen E-Mobils leuchteten auf. Dann raste es aus der Garage und krachte führerlos gegen den Baum neben unserer Einfahrt.

Wir sprangen zurück. Yvonne sah mich fassungslos an. »Hat der Virus gerade unser Auto zerstört?«

Lukas presste seine Nase gegen die Scheibe. »Immerhin hat er vorher das Garagentor aufgemacht.«

Die Deckenbeleuchtung über uns erlosch. Lukas stieß einen Schrei aus, Yvonne schnappte nach Luft. Einen Moment später flammte ein Feuerzeug auf. Ich fragte nicht, warum So-

phie ein Feuerzeug besaß. Dieses Thema würde ich ansprechen, wenn wir das derzeitige Problem gelöst hatten.

Wir folgten Sophie ins Wohnzimmer, wo Yvonne mehrere Kerzen aus einem der Schränke nahm und anzündete.

»Wir müssen Hilfe holen!«, sagte sie nachdrücklich, nachdem sie mir Lukas' Taufkerze in die Hand gedrückt hatte.

»Und wie?«

Sie deutete zur Decke. »Vom Dach aus. Dort oben gibt es den Ausstieg für den Schornsteinfeger. Du könntest hinaus kriechen und um Hilfe rufen!« Ich kannte diesen Tonfall. Den schlug sie immer an, wenn etwas kein Vorschlag war, sondern ein Befehl.

»Versuchen kann ich es ja.«

Wir stiegen die Treppe hinauf, bis zur Dachluke. Ich zog sie an dem Lederriemen herunter, klappte die Leiter aus, und wir stiegen die Stufen hinauf.

Auf dem Dachboden roch es muffig. Durch ein fleckiges Fenster fiel Sonnenlicht herein. Ich öffnete die Verriegelung und zwängte mich hinaus. Ein paar Sekunden lang kämpfte ich mit Höhenangst, bevor ich hinauf auf den Dachfirst kletterte.

»Siehst du jemanden?«, fragte Yvonne. Ich hob beide Hände ... und senkte sie wieder. Auf den Dächern der umliegenden Häuser saßen Menschen. Einige winkten mir zu, andere hielten Schilder mit der Aufschrift »Hilfe« in den Händen.

Meine Schultern sackten herab. Wie hatten wir nur glauben können, wir wären die einzigen Opfer des Intruder-Virus?

Ich beugte mich zu Yvonne hinunter, die unter mir aus dem Dachfenster schaute. »Nimm die Kreditkarte und zieh uns zwei Kaffee. Und schalte Lukas den Fernseher ein!«, rief ich. »Bis Hilfe eintrifft, wird es noch einige Zeit dauern!«

DER AUTOR

**Uwe Hermann**, Jahrgang 1961, schreibt seit mehr als 25 Jahren Kurzgeschichten. Für seine aktuelle Anthologie »Das Amt für versäumte Ausgaben« konnte er den zweiten Platz beim Deutschen Science-Fiction-Preis entgegennehmen.  
[www.UweHermann.com](http://www.UweHermann.com)

# VORSCHAU



IDEAS STUDIO / GETTY IMAGES / STOCK / AUSSCHNITT

## ZUFALL IN DER EVOLUTION – WIE WÜRDIE SIE EIN ZWEITES MAL ABLAUFEN?

Seit 30 Jahren oder fast 70 000 Generationen verfolgen Forscher akribisch die Evolution einiger Bakterienpopulationen. Die mittlerweile klassische Studie offenbart unerwartete »Erfindungen«, mit denen die Mikroben seitdem weiterarbeiten. Sie schufen sogar komplexere Ökosysteme. Auch Befunde an höheren Organismen zeigen: Das Leben umgeht Einschränkungen auf unkalkulierbare Weise.



MANUEL BARRIS / GETTY IMAGES / STOCK

## DER KLEINE UNTERSCHIED

Während der Entwicklung des Alls hat die Materie die Oberhand über die Antimaterie gewonnen. Die Ursache muss ein winziges Ungleichgewicht gewesen sein. Physiker suchen in seltenen subatomaren Vorgängen nach einer Erklärung für die Asymmetrie.



SOLIMONJEE / GETTY IMAGES / ISTOCK

## DER NÄCHSTE GROSSE KNALL

Geowissenschaftler erkunden das Innere des Vulkans Mount St. Helens. Mit neuen Sondierungsmethoden kartieren sie ein Netz von Magma-kanälen unterhalb des Vulkans, um zukünftige Vulkanausbrüche besser vorhersagen zu können.



FOTOLIA / DR. KATERINA

## MIKROBEN NACH MASS

Eine genetische Neuprogrammierung macht Bakterien zu lebenden Arzneimitteln etwa gegen Tumor- oder Erbkrankheiten. Forscher verbinden hierzu Nukleotidsequenzen, die für Proteine kodieren, mit solchen, die Genaktivitäten regulieren.

## 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.

## DIN-A5-Notizbuch

### »Marie&Isaac&Albert&Stephen.«

Unser hauseigenes Notizbuch mit edlem Leineweinband, folienkaschierter Blindprägung, Farbschnitt sowie schwarzem Gummi- und Lesezeichenband. Mit dezentem Punktraster auf 160 Innenseiten 90-g-Premiumpapier gedruckt.



**Wählen  
Sie Ihr  
Geschenk**



### Buch »Die verborgene Wirklichkeit«

Brian Greene zeigt, warum vieles dafür spricht, dass wir in den Weiten des Kosmos nicht allein sind, und welchen Parallelwelten die Astrophysiker auf der Spur sind.

## 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 2.500 Profilen herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

**AcademiaNet** – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

**Spektrum**  
der Wissenschaft

**nature**