

Spektrum

der Wissenschaft



GPS im Gehirn

Die Nobelpreisträger May-Britt und Edvard Moser erklären, wie unser neuronales Navigationssystem funktioniert

ASTRONOMIE Gibt es einen weiteren Planeten im Sonnensystem?

QUANTENCOMPUTER Mit vernetzten Bauteilen zum Durchbruch

IMMUNTHERAPIE Erste verblüffende Ergebnisse bei der Krebsbehandlung

KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

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

€ 4,99
je Ausgabe



Bestellmöglichkeit und weitere Ausgaben:
www.spektrum.de/kompakt



EDITORIAL

WO BIN ICH? UND WOHIN GEHE ICH?

Von Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

► Eines zeichnet sich inzwischen klar ab: Das Jahr 2016 wird als ein Jahr des Umbruchs für »Spektrum der Wissenschaft« in die Annalen eingehen – aus zwei Gründen. Zum einen haben wir seit Anfang des Jahres die umfassendste Umgestaltung unseres Layouts seit der Jahrtausendwende geplant – einschließlich von Grund auf neu designter Titelseiten – und mit der letzten Ausgabe schließlich in die Realität umgesetzt. Hierzu würde uns natürlich brennend Ihre Meinung interessieren: Wie gefällt Ihnen die neue Anmutung, welche Vor- und Nachteile stechen Ihnen ins Auge, haben Sie Verbesserungsvorschläge? Wir freuen uns über Ihre Rückmeldung, gleichgültig ob Lob oder Kritik!

Zum anderen erlebten wir als Verlag auch intern eine deutliche Zäsur, als wir Mitte Juni nach 15 Jahren in der Heidelberger Slevogtstraße in neue, frisch renovierte Räumlichkeiten in der Tiergartenstraße umzogen. Inzwischen sind die Kisten längst ausgepackt, und wir haben uns auch allmählich an all die neuen Wege gewöhnt; sowohl den zur Arbeit als auch jene innerhalb des Hauses. Wie komme ich jetzt am schnellsten zur Bildredaktion und welches ist noch einmal der richtige der drei Eingänge vom Treppenhaus, wenn ich direkt in die Bibliothek will?

So eine Umstellung fällt nicht leicht. Zu Beginn bin ich doch glatt einmal mit dem Fahrrad auf den Weg zum alten Verlagsgebäude eingebogen, und noch Wochen nach dem Umzug sah man manchmal Kollegen etwas desorientiert auf den Fluren umherirren. Den Weg von A nach B zu finden, ist eine beträchtliche Herausforderung für unser Gehirn, das dafür eigens ein spezielles Orientierungssystem entwickelt hat – eine Art neuronales Navi, das gewisse Ähnlichkeiten mit dem Global Positioning System GPS aufweist.

Wie dieser biologische Navigationsapparat genau funktioniert, erläutert unsere Titelgeschichte ab S. 12. Die beiden Autoren, May-Britt Moser und Edvard I. Moser, haben in jahrelanger Forschungsarbeit entscheidende Komponenten des Systems identifiziert und dafür vor zwei Jahren zusammen mit einem dritten Wissenschaftler den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin erhalten. Zusätzliche Brisanz erhielten ihre Entdeckungen jüngst noch durch die Beobachtung, dass die hier beteiligten Nervenzellen mit die ersten sind, die bei der Alzheimerdemenz absterben.

Jederzeit gute Orientierung wünscht Ihnen Ihr

Hartwig Hanser



NEU AM KIOSK AB 26.8.!

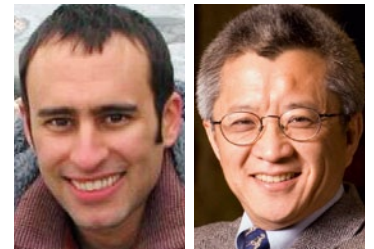
Warum Popcorn knallt und weitere physikalische Alltagsrätsel erklärt der Physikdidaktiker H. Joachim Schlichting in **Spektrum-Spezial Physik – Mathematik – Technik 3/2016**.

AUTOREN DIESER AUSGABE



MAY-BRITT MOSER EDVARD I. MOSER

Das Forscherehepaar, beide Professoren an der Universität Trondheim, erhielt 2014 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin für die Entdeckung spezieller Orientierungsneurone im Säugerhirn (S. 12).



STEPHEN BRUSSATE ZHE-XI LUO

Die frühe Evolution der Säugetiere in der Dinosaurierzeit steht im Fokus der beiden Wissenschaftler. Neue Fossilien aus China und den USA überraschen mit ihrer Vielfalt an Arten (S. 42).



JASLYN B. K. LAW

An der technischen Hochschule Ngee Ann Polytechnic in Singapur entwickelt die Materialwissenschaftlerin Techniken zur hochpräzisen Bearbeitung von Oberflächen im Nanomaßstab (S. 70).

6 SPEKTROGRAMM

Labyrinth aus kondensiertem Erbgut

Planet bei Proxima Centauri

Krebsgefahr durch zu hohes Körpergewicht

Warum die Höhlenbären ausstarben

Auftritt einer Nova

Anthropogene Erwärmung schon seit 1830

Perlmutter nach dem Vorbild der Natur

22 FORSCHUNG AKTUELL

Tintenfisch mit Taschenlampe

Unsichtbar dank Symbiose mit Leuchtbakterien

Forscher bringen Licht ins Darknet

Wie viel Kriminalität steckt tatsächlich in der Parallelwelt des Internets?

Falsche DNA-Spuren

Genetische Fingerabdrücke können Unbeteiligte ins Visier rücken

31 SPRINGERS EINWÜRFE

Wo die Armen wohnen

Bilderkennungssoftware entlockt Satellitenaufnahmen Informationen über die Orte größten Mangels

51 FREISTETTERS FORMELWELT

Die Freiheit der imaginären Zahlen

In der Mathematik existiert alles, was man sich vorstellen kann. Es darf nur keinen Widerspruch erzeugen!

60 SCHLICHTING!

Die Melodie des Wasserkochens

Die Geräusche beim langsamen Erhitzen bis zum Sieden verraten viel über die physikalischen Vorgänge im Wasser

12 NEUROWISSENSCHAFT **DAS GPS IM GEHIRN**

Wie orientieren sich Säugetiere? Die Entdecker unseres neuronalen Navigationssystems beschreiben, wie das Gehirn arbeitet, damit wir den Weg von A nach B finden.

Von May-Britt Moser und Edvard I. Moser

32 MEDIZIN **KREBS BEKÄMPFEN MIT DEM EIGENEN IMMUNSYSTEM**

Immuntherapien gegen Krebs stehen noch ziemlich am Anfang, liefern aber bereits einzelne verblüffende Ergebnisse. Den behandelnden Ärzten fordern sie vor allem eines ab: Fingerspitzengefühl.

Von Karen Weintraub

42 EVOLUTION **DER AUFSTIEG DER SÄUGETIERE**

Paläontologen zeichnen ein völlig neues Bild der frühen Säuger. Schon zu Zeiten der Dinosaurier bildeten sie diverse Linien mit unterschiedlichsten Formen – »Maulwürfe«, »Biber«, »Raubtiere«, sogar »Gleithörnchen«.

Von Stephen Brusatte und Zhe-Xi Luo

52 ASTRONOMIE **GIBT ES PLANET X?**

Serie: Unbekanntes Terrain im Sonnensystem (Teil 1) Einige Himmelskörper jenseits von Neptun bewegen sich auf ungewöhnlichen Bahnen. Manche Astronomen schließen daraus auf die Existenz eines weiteren Planeten.

Von Michael D. Lemonick

62 INFORMATIK **VERNETZTE QUANTENCOMPUTER**

Die ersten Computer, die sich die Gesetze der Quantenmechanik zu Nutze machen, sind noch störanfällige Prototypen für einfache Rechenoperationen. Durch Vernetzung vieler derartiger Bausteine wollen die Entwickler dem Ziel eines echten Quantencomputers nun näher kommen.

Von Christopher R. Monroe, Robert J. Schoelkopf und Mikhail D. Lukin

70 FERTIGUNGSTECHNIK **PRÄGEN IM NANOFORMAT**

Die Industrie benötigt immer filigranere Bauteile im Nanomaßstab. Ausgeklügelte Stempelverfahren gestatten es, diese kostengünstig herzustellen.

Von Jaslyn B. K. Law

76 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **JUGENDSTREICH EINER FIELDS-MEDAILLISTIN**

Maryam Mirzakhani, die erste Frau, die je mit der Fields-Medaille ausgezeichnet wurde, hat 1996 als 19-Jährige ein Ergebnis erzielt, das bis heute Bestand hat.

Von Michael Joswig

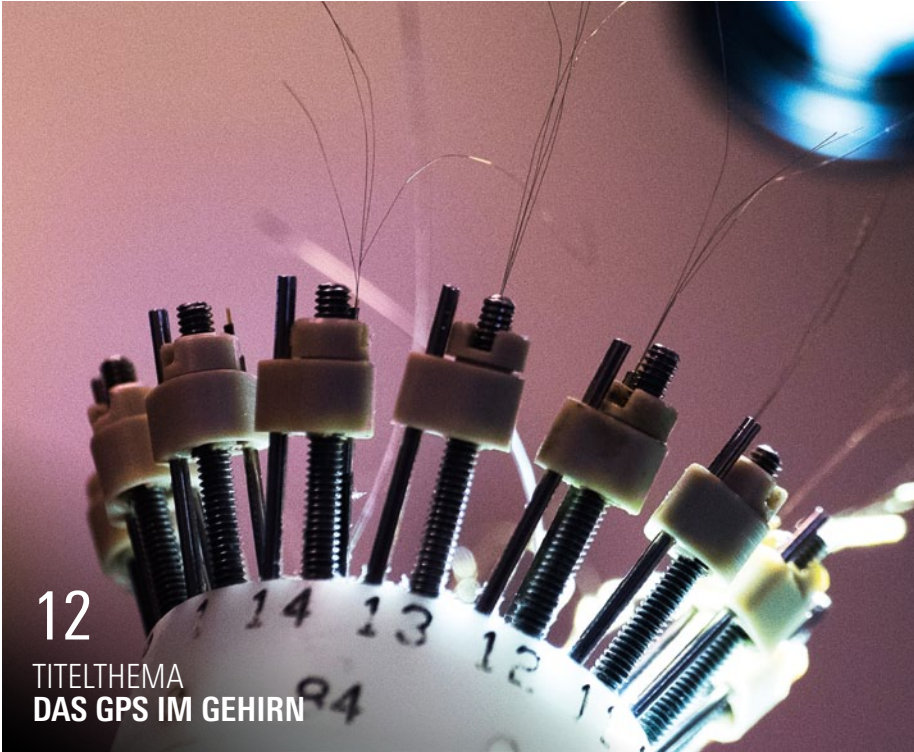
80 ÄGYPTEN **DAS GRAB DES MAGIERS**

Serie: Magie der Schrift (Teil 2) Stark zerfallen und größtenteils kaum mehr lesbar harrt eine Grabbeigabe gut ein Jahrhundert nach ihrer Entdeckung noch immer ihrer systematischen Erforschung: die »Ramesseum-Papyri«.

Doch eines erscheint inzwischen sicher: Dies war eine magische Bibliothek.

Von Joachim Friedrich Quack

FREDRIK REINHOLD



12

TITELTHEMA
DAS GPS IM GEHIRN

JAMES GURNEY



42

EVOLUTION
AUFSTIEG DER SÄUGETIERE

BOB MILLER



52

ASTRONOMIE
GIBT ES PLANET X?

PRIVAT / STANFORD UNIVERSITY



76

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
JUGENDSTREICH
EINER FIELDS-MEDAILLISTIN

ANG IMAGES / WERNER FORMAN



80

ÄGYPTEN
DAS GRAB
DES MAGIERS

86 ZEITREISE

Von den Ursachen der Eiszeit
zum Kunstherz

88 REZENSIONEN

Ingo Arndt, Jürgen Tautz:

GrasArt

Arieh Ben-Naim:

The Briefest History of Time

Amrei Wittwer, Gerd

Folkers: Schmerz

Clara Löh, Stefan Krauss,

Niki Kilbertus (Hg.):

Quod erat knobelandum

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

Supervision

Virtuelle Beziehungen haben
ihre Tücken

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

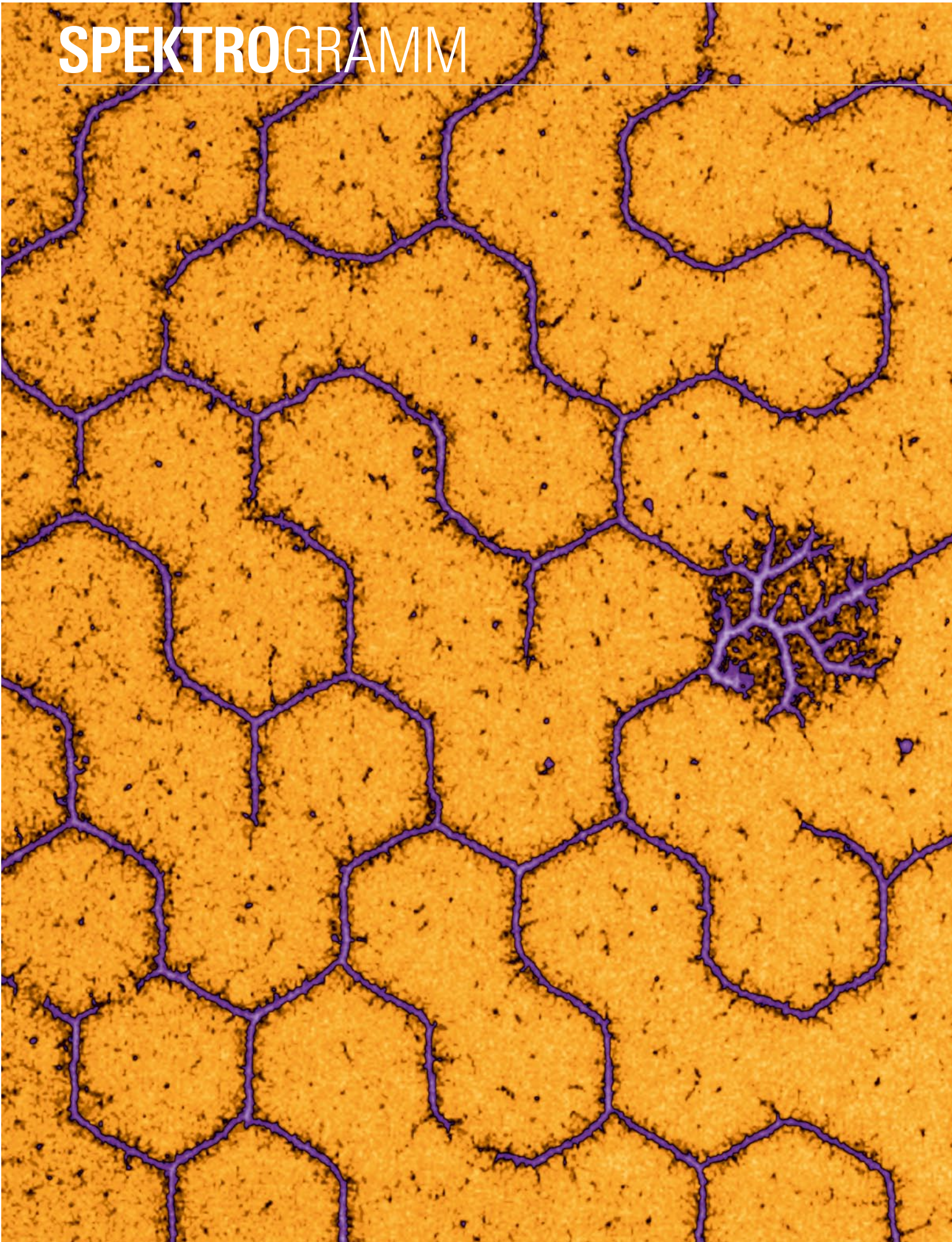
Titelbild: Private Publishing;
Illustration: Uwe C. Beyer

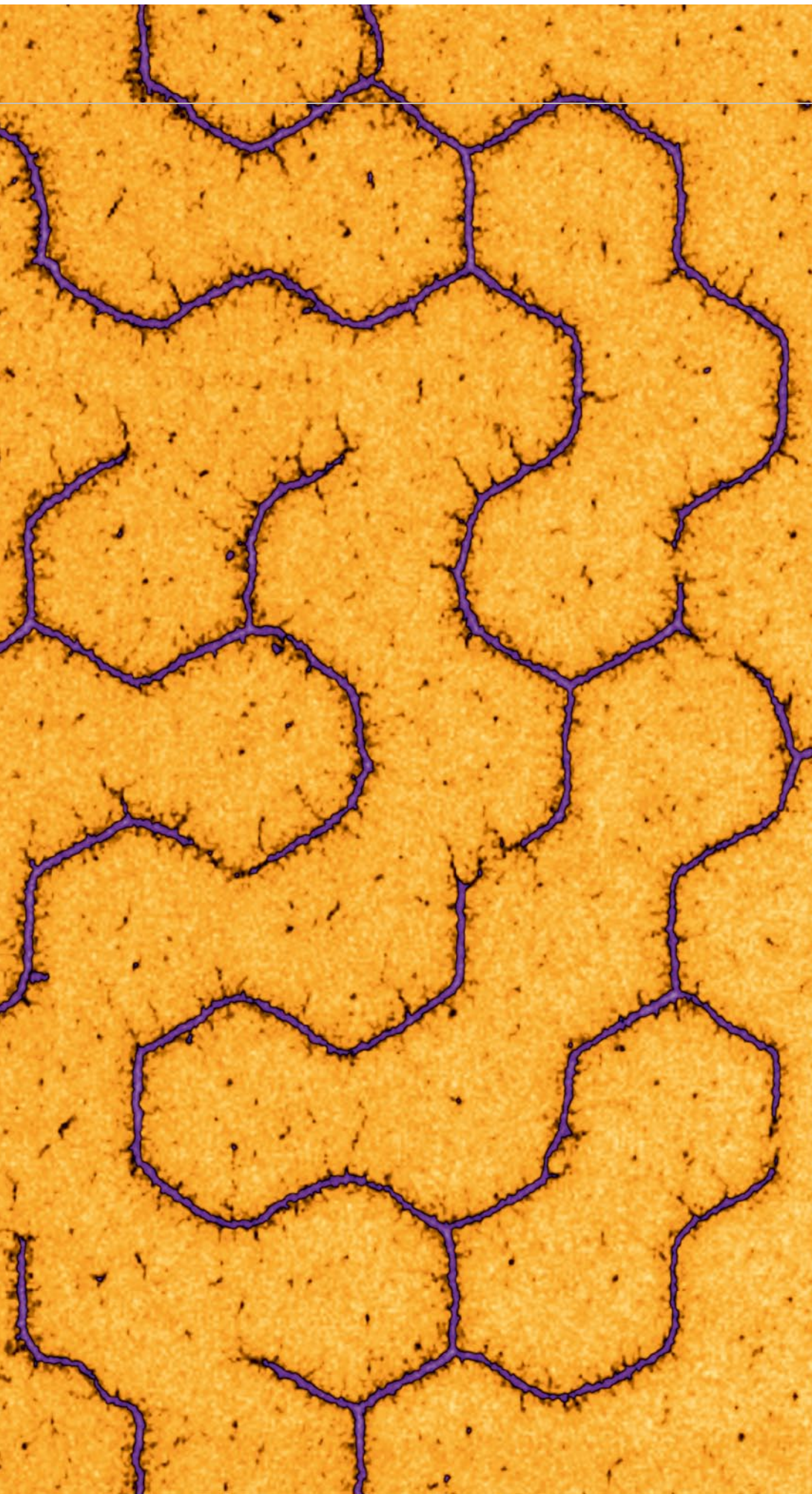


Alle Artikel auch digital
auf **Spektrum.de**

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

SPEKTROGRAMM





LABYRINTH AUS KONDENSIERTEM ERBGUT

► In der Natur müssen oft große Mengen Erbsubstanz auf kleinstem Raum untergebracht werden. Physiker haben diese so genannte DNA-Kondensation nun künstlich nachempfunden. Sie lagerten Erbgutstränge entlang dünner, mittels Elektronenstrahlithografie vorgezeichneter Kanäle – beispielsweise dieser wabenförmigen Struktur –, indem sie die organische Verbindung Spermidin hinzugaben. So könnten etwa auf Biochips gezielt Leiterbahnen für Signale an- und ausgeschaltet werden.

Nat. Nanotechnol. 10.1038/nnano.2016.142, 2016

ESO / MARTIN KORNMESSER



Diese künstlerische Illustration zeigt, wie es auf Proxima b aussehen könnte. Der Planet, der ähnlich groß ist wie die Erde, umrundet den roten Zwergstern Proxima Centauri. Dieser bildet mit dem Doppelstern Alpha Centauri (Pfeil) möglicherweise ein Dreifachsystem.

ASTRONOMIE FELSIGER PLANET BEI PROXIMA CENTAURI

Interstellare Raumfahrt, so sie jemals möglich wird, hat ab sofort ein erstes Ziel: Proxima b. Dieser jetzt entdeckte, erdähnliche Exoplanet ist gerade einmal 4,2 Lichtjahre von uns entfernt. Er umrundet Proxima Centauri, den nächstgelegenen Nachbarn unserer Sonne.

Die zur Verfügung stehenden Daten sprechen dafür, dass Proxima b die 1,3-fache Masse der Erde besitzt und seinen Stern in lediglich 11,2 Tagen umläuft. Vermutlich wendet er diesem dabei immer die gleiche Seite zu. Weil der Stern aber rund 36 000-mal schwächer leuchtet als unsere Sonne, sind die Temperaturen auf Proxima b moderat – sie dürften in der Nähe des

Gefrierpunkts von Wasser liegen und erlauben vielleicht die dauerhafte Existenz flüssigen Wassers. Der Planet ist wahrscheinlich ein felsiger Himmelskörper mit Eisenkern und silikatischer Kruste – und nur geringfügig größer als die Erde. Ob er eine Atmosphäre besitzt, ist unbekannt.

Forscher um Guillem Anglada-Escudé von der Queen Mary University (London) haben den Planeten nachgewiesen, indem sie die Radialgeschwindigkeit von Proxima Centauri mit dem Spektrografen Harps erfassten, einem Teleskop der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile. Wenn der Planet während seines Umlaufs periodisch an dem Stern zerrt, äußert sich das in Veränderungen des Sternspektrums, und diese hat das Team gemessen. Dabei waren viele Fehlerquellen auszuschließen, was dank

weltweiter Bemühungen gelang.

Proxima Centauri ist ein Roter Zwerg mit rund einem Siebtel des Durchmessers der Sonne. Er befindet sich nahe des Doppelsterns Alpha Centauri. Möglicherweise bildet er mit diesem ein Dreifachsystem, jedenfalls bewegt er sich am Himmel gleich schnell und in dieselbe Richtung. Laut den Daten könnte er außer Proxima b noch einen weiteren Planeten haben, der ihn einmal alle 50 bis 500 Tage umrundet.

Nature 536, S. 437–440, 2016

MEDIZIN KREBSGEFAHR DURCH ZU HOHES KÖRPERGEWICHT

Übergewicht und Fettleibigkeit erhöhen das Krebsrisiko. Dieser Zusammenhang war für einige

Tumorerkrankungen schon bekannt; Forscher haben ihn nun für acht weitere nachgewiesen. Das Team um Kurt Straif von der Internationalen Agentur für Krebsforschung in Lyon (Frankreich) wertete mehr als 1000 einschlägige Studien aus. Zusammengefasst belegen sie, dass Übergewicht und Fettleibigkeit das Risiko steigern für Krebserkrankungen des Magens, Gehirns und Blut bildenden Systems, der Leber, Gallenblase, Bauchspeicheldrüse und Schilddrüse sowie der Eierstöcke. Bereits bestätigt ist dieser Zusammenhang für Darm-, Speiseröhren-, Nieren-, Brust- und Gebärmutterkrebs.

Bei vielen Tumorerkrankungen, schreiben die Forscher, lasse sich eine positive Dosis-Wirkungs-Beziehung nachweisen: je höher der Körpermasseindex (Body Mass Index), desto größer das Krebsrisiko. Das gelte sowohl für Frauen als auch für Männer und in allen geografischen Regionen, für die entsprechende Daten vorliegen. Weltweit sind schätzungsweise 640 Millionen Erwachsene und 110 Millionen Kinder fettleibig, viele von ihnen in den westlichen Wohlstandsgesellschaften.

Fettleibigkeit und Übergewicht begünstigen Krebserkrankungen auf verschiedene Weise. Ein übermäßig hoher Körperfettanteil führt etwa zur vermehrten Ausschüttung von Östrogenen, Testosteron sowie Insulin und wirkt zudem entzündungsfördernd. All diese Faktoren können das Tumorstadium vorantreiben.

N. Eng. Journ. Med. 375, S. 794–798, 2016

PALÄO BIOLOGIE

WARUM DIE HÖHLENBÄREN AUSSTARBEN

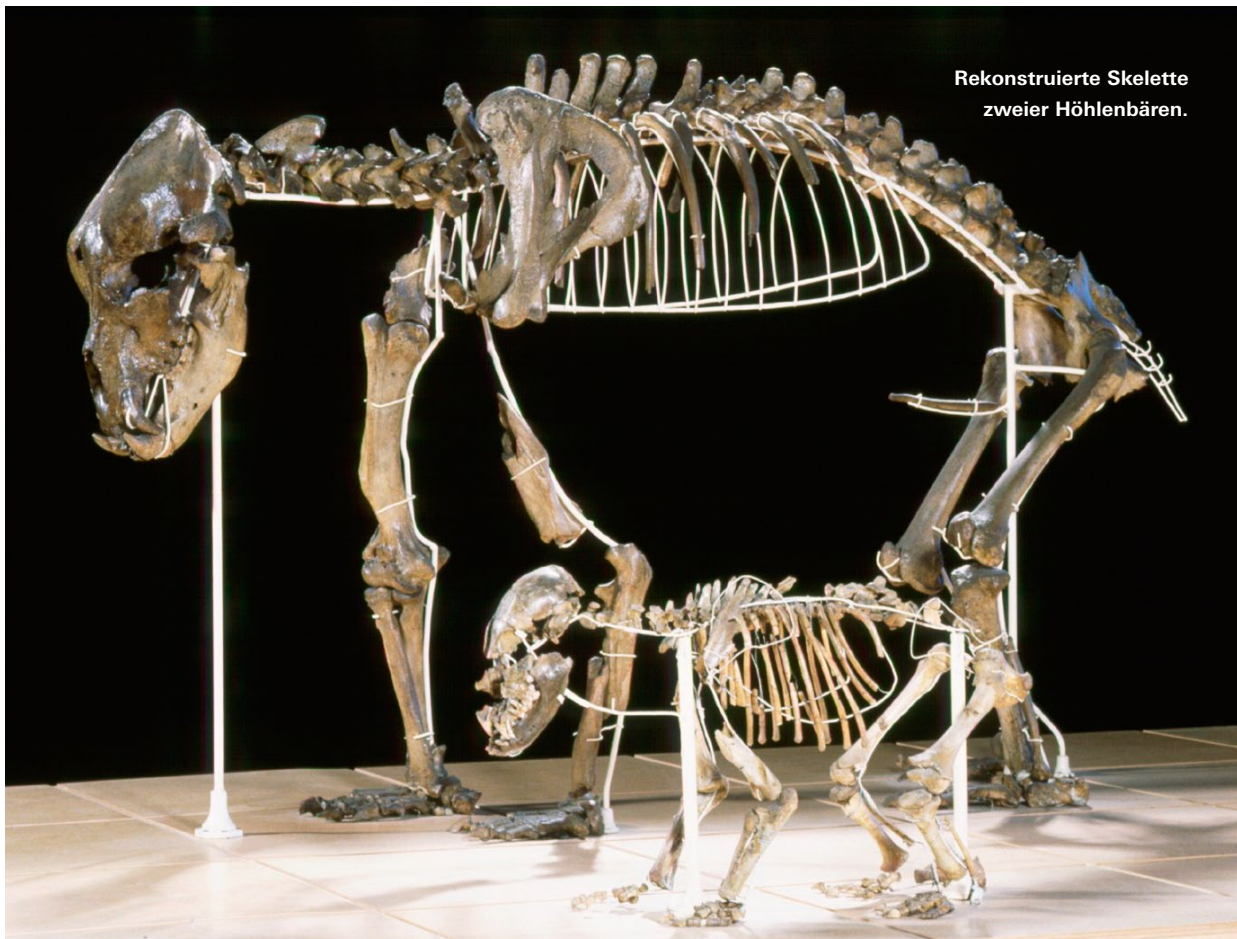
► Der Höhlenbär (*Ursus spelaeus*) war eine überaus imposante Erscheinung – mit etwa 1,7 Meter Schulterhöhe und einer Kopf-Rumpf-Länge bis zu 3,5 Metern überragte er den Braunbären deutlich. Doch anders als dieser jagte er wohl nicht. Wie Forscher um Yuichi I. Naito von der Universität Tübingen an Höhlenbärknochen belegt haben, ernährten sich die gewaltigen Tiere rein pflanzlich. Darauf deutet der niedrige Gehalt des Stickstoffisotops ^{15}N in den Knochen hin.

Der Schädelbau, die kräftigen Kiefer und die großflächigen Zähne von *Ursus spelaeus* hatten schon früher vermuten lassen, dass er Pflanzenfresser war. Dementsprechend besiedelte er wohl nur Gebiete mit dichter Vegetation. Das machte ihn dem modernen Pandabären (*Ailuropoda melanoleuca*) ähnlich, der ebenfalls nahezu ausschließlich Pflanzen zu sich nimmt. Eventuell trug diese spezialisierte Ernährung dazu bei, dass der Höhlenbär vor rund 28000 Jahren ausstarb, wie die Forscher schreiben. Damals kühlte sich das eiszeitliche Klima ab,

was zu einem Rückgang der Vegetation geführt haben und dem Bären damit die Lebensgrundlage entzogen haben dürfte.

Eine rein pflanzliche Ernährung bringt für so große Wesen wie *Ursus spelaeus* einige Nachteile mit sich. Um ihren Bedarf zu decken, mussten die Tiere wahrscheinlich sehr viel fressen – zumal ihr Verdauungsapparat wohl nicht ideal auf Pflanzenkost abgestimmt war, wie es auch beim Pandabären heute der Fall ist. Ein Panda benötigt täglich bis zu 40 Kilogramm Bambus, und an seine wenig effiziente Nahrungsverwertung hat er sich mit einer außergewöhnlich niedrigen Stoffwechselrate angepasst. Moderne Braunbären (*Ursus arctos*) dagegen sind Allesfresser, was sich im höheren ^{15}N -Gehalt ihrer Knochen widerspiegelt. Sie verspeisen neben Früchten, Beeren und Blättern auch mal Lachs und erlegen sogar große Tiere. Dies macht sie äußerst flexibel und ermöglicht ihre weltweite Verbreitung.

JQS 10.1002/jqs.2883, 2016



Rekonstruierte Skelette
zweier Höhlenbären.

ROYAL BELGIAN INSTITUTE OF NATURAL SCIENCES (RBINS)

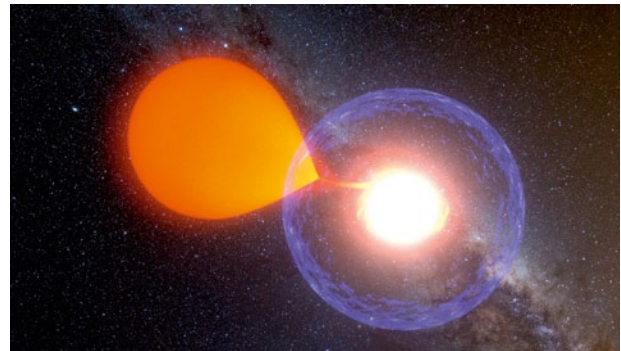
ASTROPHYSIK AUFTRITT EINER NOVA

► Erstmals haben Astronomen eine Nova, die explosionsartige Strahlungszunahme eines Sterns, live verfolgt. Der Beobachtungszeitraum erstreckte sich über 13 Jahre.

Die Nova V1213 Cen befindet sich rund 23 400 Lichtjahre von uns entfernt im südlichen Sternbild Zentaur. Seit dem Jahr 2003 steht sie im Rahmen des Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) unter Beobachtung. Im Mai 2009 leuchtete V1213 Cen auf und wurde dabei einige Wochen lang millionenfach heller. Astronomen um Przemek Mróz vom Astronomischen Observatorium der Universität Warschau haben das Verhalten der Nova zwischen 2003 und 2016 kontinuierlich verfolgt.

V1213 Cen ist ein enges Doppelsternsystem aus einem Weißen Zwerg und einer massearmen Begleitsonne. Es rotiert in 5,1 Stunden einmal um den gemeinsamen Schwerpunkt. Vom Begleitstern tritt Gas, überwiegend Wasserstoff, auf den Weißen Zwerg über. Dort sammelt es sich in einer dünnen, komprimierten Schicht. Überschreiten Druck und Temperatur in der Schicht bestimmte Werte, beginnt der Wasserstoff explosionsartig zu Helium zu fusionieren. Dabei heizt sich die Materie enorm auf, das System erstrahlt, und es wird Gas ausgestoßen. Der Weiße Zwerg bleibt dabei intakt.

Laut den Beobachtungen zeigte V1213 Cen zunächst kleinere Ausbrüche mit etwa 16-facher Helligkeitszunah-



Schematische Darstellung des Doppelsternsystems V1213 Cen. Ein durch Gezeitenkräfte verformter Stern umkreist einen Weißen Zwerg, bei dem gerade eine Nova einsetzt.

me. Sie dauerten im Schnitt rund sechs Tage, mit je 18 Tagen Ruhe dazwischen. Bei der eigentlichen Nova 2009 stieg die Helligkeit um mehr als das Zweimillionenfache. Dabei verbrannte bis zu ein Hunderttausendstel der Sonnenmasse an Wasserstoff. Seither nimmt die Helligkeit des Systems langsam wieder ab.

Mróz und seine Kollegen stellten fest, dass derzeit deutlich mehr Wasserstoff auf den Weißen Zwerg strömt als vor dem Ausbruch. Der Begleitstern hat sich infolge des Nova-Ausbruchs offenbar extrem aufgeheizt und ausgedehnt, so dass nun mehr Materie zum Partner übertritt. Dieser Zustand könnte noch gut 100 Jahre anhalten.

Nature 10.1038/nature19066, 2016

KLIMAFORSCHUNG ANTHROPOGENE ERWÄRMUNG SCHON SEIT 1830

► Wissenschaftler um Nerilie Abram von der Australian National University haben Belege dafür gefunden, dass die vom Menschen verursachte Zunahme der globalen Durchschnittstemperaturen wesentlich früher einsetzte als bisher gedacht. Demnach lässt sich die anthropogene Erwärmung bereits um 1830 herum nachweisen.

Die Forscher untersuchten natürliche Klimaarchive,

etwa Jahresringe von Bäumen und Korallen, Tropfsteine, marine Sedimente und Eisbohrkerne. Die dabei erhaltenen Befunde glichen sie mit Klimamodellen ab, einschließlich solcher,

die für den jüngsten Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC) herangezogen wurden. So rekonstruierten sie das Weltklima während der zurückliegenden 500 Jahre.

Aus den Arbeiten geht hervor, dass insbesondere in den tropischen Ozeanen und in der Arktis schon ab 1830 ein Erwärmungstrend einsetzte, der sich den natürlichen Klimaschwankungen überlagerte. Das war die Zeit der frühen Industrialisierung und somit der beginnenden forcierten Freisetzung von Treibhausgasen. Instrumentell gewonnene Aufzeichnungen von Klimadaten, die im 20. Jahrhundert beginnen, decken offenbar einen zu kurzen Zeitraum ab, um den anthropogenen Klimawandel umfassend abzubilden.

Nature 536, S. 411–418, 2016



Nerilie Abram untersucht die Jahreslagen eines Stalagmiten.

STUART HAY, AUSTRALIAN NATIONAL UNIVERSITY

MATERIAL-FORSCHUNG PERLMUTT NACH DEM VORBILD DER NATUR

▶ Perlmutter entsteht auf den Schalen bestimmter Weichtiere, etwa der Kreiselschnecken (*Trochidae*), den Seeohren (*Haliotis*) und verschiedener Perlmuscheln (*Pinctada*). Das Biomineral ist stoß- und bruchfest und unterbindet Rissbildungen in der Schale.

Diese außergewöhnliche Stabilität liegt im Aufbau begründet: Zahlreiche Kristallplättchen aus Aragonit (Kalziumkarbonat), die jeweils nur 0,5 Mikrometer Dicke besitzen, sind kom-

plex verzahnt und mit einem transparenten Biomörtel aus Chitin und Proteinen verbunden. Diese Schichtstruktur erklärt auch den schillernden Glanz des Materials: Die Reflexion des einfallenden Lichts an den zahllosen Kristallschichten führt zu Interferenzeffekten.

Schon seit Längerem versuchen Materialforscher, Perlmutter künstlich herzustellen. Bisher waren dazu hohe Temperaturen und spezielle Ausgangsstoffe nötig, und dennoch reichten die Ergebnisse bei wichtigen Eigenschaften wie Härte, Festigkeit und Glanz nicht an das natürliche Vorbild heran. Eine Arbeitsgruppe um Shu-Hong Yu von der Chine-

sischen Universität für Wissenschaft und Technologie in Hefei hat nun ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, das schillernde Material nach dem Vorbild der Natur langsam wachsen zu lassen. Das künstliche Perlmutter ist etwa ein bis zwei Millimeter dick, aus Schichten kleiner Kalziumkarbonatplättchen aufgebaut und widersteht in Tests der Rissbildung ähnlich gut wie das natürliche Vorbild.

Um das Anwachsen des Materials bei Schalentieren nachzuahmen, erzeugen die Wissenschaftler zunächst eine lamellenähnliche Struktur aus dem Polysaccharid Chitin. Durch diese pumpen sie anschließend eine Salz-

lösung, was dazu führt, dass entlang der Chitinlamellen feine Plättchen aus Aragonit auskristallisieren – jener Variante des Kalziumkarbonats, die sich auch in Perlmutter findet.

Schließlich fügen die Forscher zwischen die mineralisierten Lamellen das Strukturprotein Fibroin ein, welches in Seide enthalten ist, und pressen den Stapel bei 80 Grad Celsius zusammen. Das Ergebnis ist eine Schichtstruktur aus parallelen Aragonitplättchen, die von Chitin und Fibroin stabilisiert wird und sowohl äußerlich wie in den mechanischen Eigenschaften natürlichem Perlmutter ähnelt.

Science 10.1126/science.aaf8991, 2016

ANZEIGE



2°CAMPUS

www.2-Grad-Campus.de

KLIMARETTER GESUCHT!

Forschen ist deine Leidenschaft? Klimaschutz liegt dir am Herzen? Dann mach' mit bei der WWF-Schülerakademie 2°Campus!

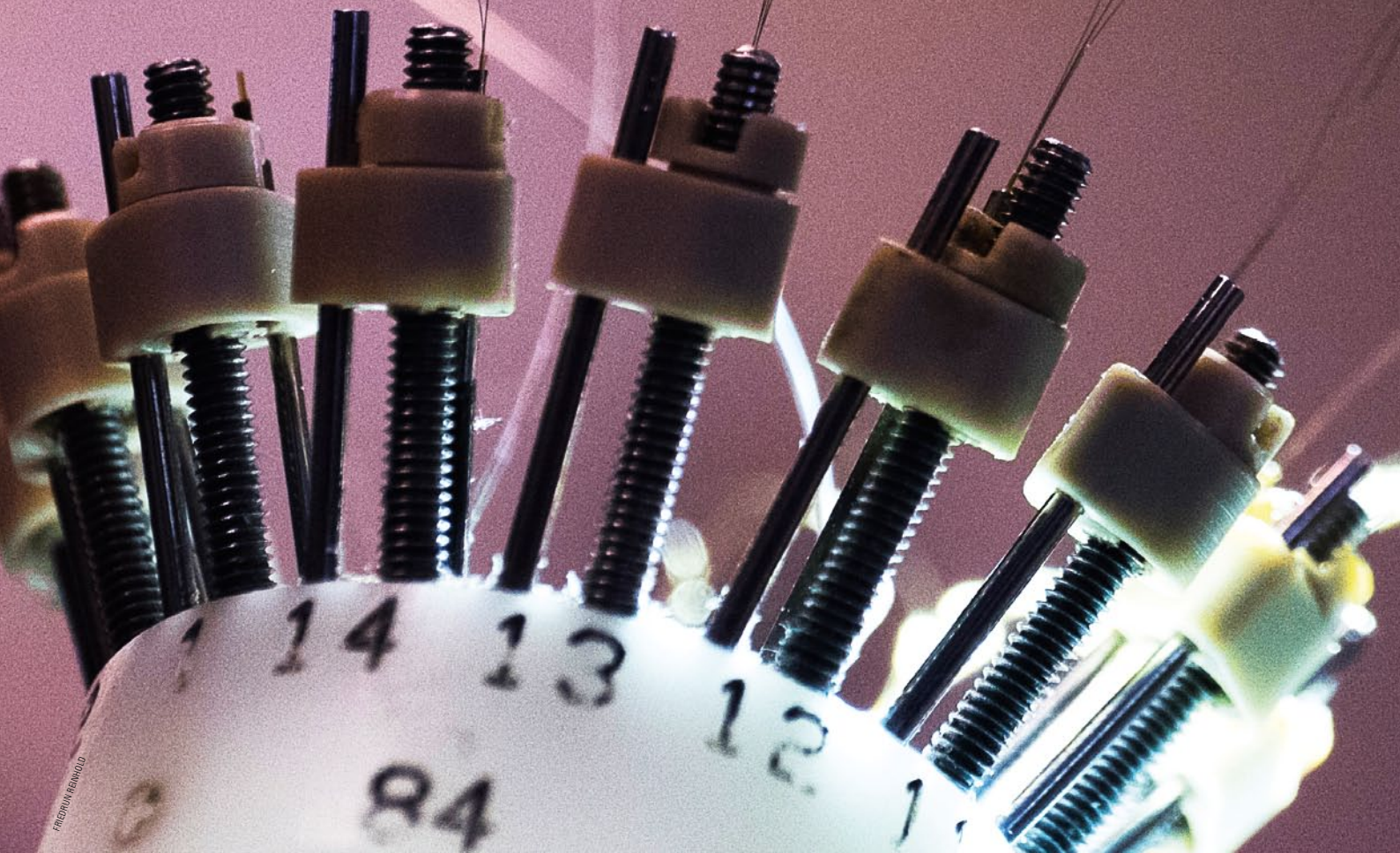
Lerne Gleichgesinnte kennen, sei Teil toller Aktionen und aktueller Forschung. Bring dich und deine einzigartigen Ideen ein! Nur gemeinsam können wir eine klimafreundliche Zukunft gestalten. **Bewirb dich jetzt bis zum 01. Dezember 2016 für den 2°Campus 2017!** Alle Infos findest du hier: www.2-grad-campus.de

NEUROWISSENSCHAFT DAS GPS IM GEHIRN

Wie orientieren sich Säugetiere? Die Entdecker unseres neuronalen Navigationssystems beschreiben, wie dessen Komponenten zusammenarbeiten, damit wir den Weg von A nach B finden.

May-Britt Moser und Edvard I. Moser sind Professoren für Psychologie und Neurowissenschaft an der Norwegischen Universität für Naturwissenschaft und Technologie in Trondheim. Gemeinsam gründeten sie dort 2007 das Kavli-Institut für systemische Neurowissenschaft und 2013 das Center for Neural Computation. 2014 erhielten sie zusammen mit John O'Keefe vom University College London den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin für ihre Entdeckung des neuronalen Navigationssystems im Gehirn, welches sie hier beschreiben.

» spektrum.de/artikel/1417452





In ihrem Trondheim Labor tragen die Autoren Schutzanzüge, um möglichst keine Krankheitserreger einzuschleppen. Zum detaillierten Erfassen der Aktivität von Nervenzellen nutzen sie Bündel extrem dünner Elektroden (links).

FREDRIK BEINWOLD

► Dank GPS kann sich heute jeder problemlos in einer unbekanntem Stadt zurechtfinden. Doch wie kommen wir ohne technische Hilfsmittel ans Ziel? Vor dem digitalen Zeitalter gelang uns dies ja schließlich auch!

Tatsächlich nutzt das Gehirn von Säugetieren ein vergleichbares, höchst raffiniertes Orientierungssystem. Ähnlich wie das GPS in Handys und Navigationsgeräten bestimmt es, wo wir uns befinden und wohin wir uns bewegen. Dazu verrechnet es eine Vielzahl an Informationen über unsere Position im Raum und den Verlauf der Zeit miteinander. Das alles läuft normalerweise ganz mühelos im Hintergrund ab, so dass wir kaum etwas davon mitbekommen. Erst wenn wir uns verlaufen oder unser Orientierungssinn durch Verletzungen oder Krankheiten in Mitleidenschaft gezogen ist, merken wir, wie wichtig das neuronale Navi im Kopf für unseren Alltag ist.

Ohne die Fähigkeit, den eigenen Aufenthaltsort zu bestimmen und sich in der Umwelt zurechtzufinden, könnten Menschen und Tiere sich weder ernähren noch fortpflanzen – sie ist also lebensnotwendig. Welchen Perfektionsgrad dabei speziell das Navigationssystem der Säugetiere erreicht hat, zeigt der Vergleich mit anderen Arten. Der eher primitiv aufgebaute Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* zum Beispiel besitzt nur 302 Nervenzellen und orientiert sich fast ausschließlich entlang zunehmender oder abnehmender Intensität von Geruchssignalen.

Tiere mit höher entwickeltem Nervensystem wie beispielsweise Wüstenameisen oder Honigbienen nutzen zusätzliche Strategien. Eine davon ist die Wegintegration. Bei diesem GPS-artigen Mechanismus berechnen Nervenzellen die jeweils aktuelle Position, indem sie fortlaufend die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit bezüglich eines Ausgangspunkts registrieren. Dies gelingt ihnen, ohne Anhaltspunkte aus der Umwelt, etwa markante Objekte oder Geländeformationen, zu Hilfe zu nehmen.

Wirbeltiere haben ein noch umfangreicheres Repertoire von Fertigkeiten zum Orientieren entwickelt. Speziell Säuger erstellen detaillierte neuronale Karten der Außenwelt, und zwar in Form elektrischer Aktivitätsmuster von Nervenzell-

gruppen im Gehirn. Deren Feuersalven bilden die Umgebung des Tiers und seine Position darin ab. Solche mentalen Karten finden sich wohl vor allem in der stark gefalteten Hirnrinde, die sich erst vergleichsweise spät in unserer Evolution herausbildete.

In den letzten Jahrzehnten entwickelten Forscher eine recht genaue Vorstellung davon, wie das Gehirn solche Karten erzeugt und bei Ortsveränderungen aktualisiert. Laut neueren Studien besteht das Navigationssystem der Säuger aus mehreren spezialisierten Zelltypen, die gemeinsam den Aufenthaltsort, die zurückgelegte Distanz und die Richtung sowie Geschwindigkeit der Fortbewegung aufzeichnen. Im Verbund produzieren diese Zellen eine dynamische Karte der Umwelt, die nicht nur der aktuellen Orientierung dient, sondern auch zum späteren Verwenden im Gedächtnis gespeichert bleiben kann.

Ratten erstellen mentale Karten ihrer Umgebung, um die jeweils beste Route zu planen

Die Forschung auf dem Gebiet begann mit dem amerikanischen Psychologen Edward C. Tolman (1886–1959), der von 1918 bis 1954 an der University of California in Berkeley lehrte. Vorherige Experimente mit Ratten schienen zu zeigen, dass die Tiere sich zurechtfinden, indem sie auf Reize entlang ihrer Route reagieren und sich diese einprägen. So glaubte man zum Beispiel, sie merkten sich die Abfolge von Links- und Rechtswendungen zwischen Start und Ziel, um sich in einem Labyrinth zu orientieren. Diese Vorstellung zog jedoch nicht die Möglichkeit in Betracht, dass die Nager ein mentales Gesamtbild des Labyrinths entwerfen könnten, um die beste Route zu planen.

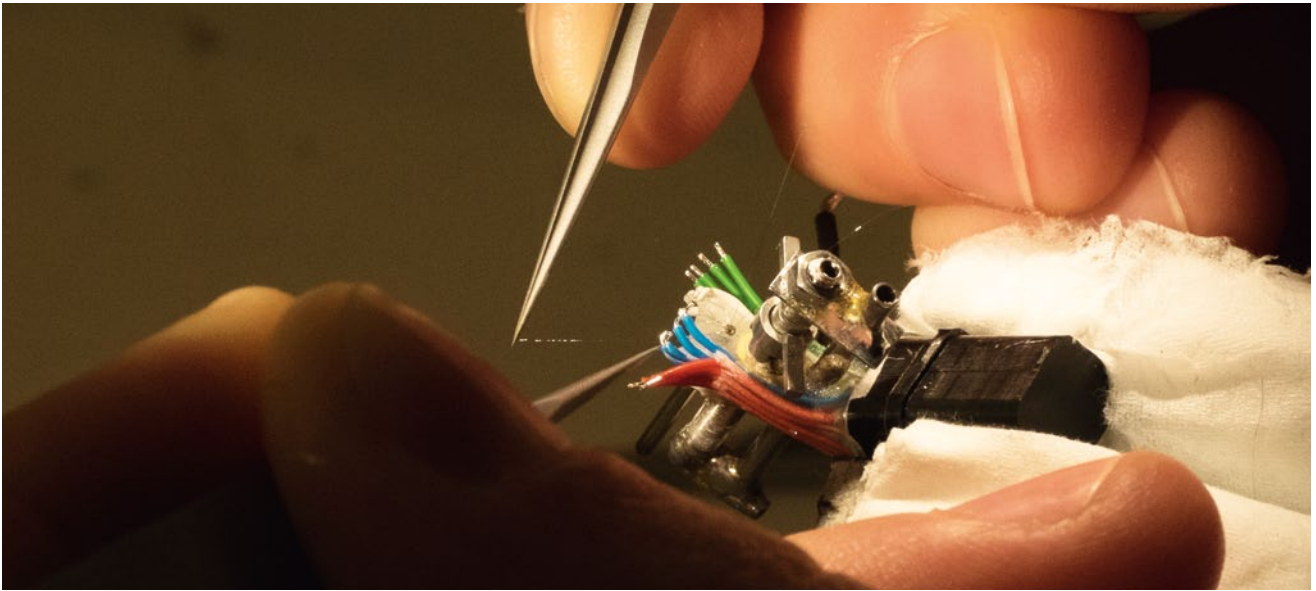
Tolman verabschiedete sich von solchen herrschenden Lehrmeinungen. Er hatte nämlich beobachtet, dass Ratten Abkürzungen nehmen oder Umwege gehen – was sie nicht tun sollten, falls sie sich lediglich eine Abfolge von Bewegungsmustern einprägen. Daraus schloss Tolman, dass die Tiere mentale Karten ihrer Umgebung erstellen, welche die räumlichen Gegebenheiten der Außenwelt repräsentieren. Diese neuronalen Modelle der Umwelt dienen Tolman zufolge nicht nur dazu, den Weg zu einem Ziel zu finden, sondern scheinen auch Ereignisse und Erlebnisse zu speichern, die mit bestimmten Orten verknüpft sind.

Tolmans Ideen, die er um das Jahr 1930 erstmals formulierte, blieben für Jahrzehnte umstritten. Die Fachwelt akzeptierte sie nur zögernd, vor allem weil sie ausschließlich auf Beobachtungen des Verhaltens von Versuchstieren beruhten, die sich ganz unterschiedlich interpretieren ließen. Denn Tolman verfügte nicht über die nötigen Werkzeuge, um zu prüfen, ob im Gehirn der Tiere tatsächlich virtuelle Karten der Umgebung existierten.

Es dauerte rund 40 Jahre, bis sich die Existenz solcher mentaler Karten experimentell belegen ließ. In den 1950er Jahren ermöglichten neu entwickelte, extrem dünne Mikroelektroden erstmals, die elektrische Aktivität einzelner Neurone im Gehirn eines wachen Tiers aufzuzeichnen. Um Informationen weiterzuleiten, lösen die Zellen Aktionspotenziale aus – schlagartige Veränderungen der elektrischen Spannung der Zellmembran. Dadurch setzen sie an

AUF EINEN BLICK NEURONALE NAVIGATION

- 1 Die Ortszellen im Hippocampus feuern jeweils immer an bestimmten Positionen und erstellen so eine Karte der unmittelbaren Umgebung. Ändert sich Letztere, entsteht eine neue Karte.
- 2 Gitter-, Kopfrichtungs-, Grenz- und Geschwindigkeitszellen im entorhinalen Kortex liefern von der konkreten Umgebung unabhängige Informationen zur Navigation.
- 3 Fehlfunktionen des Systems führen zu schweren Orientierungsproblemen, wie sie etwa bei der Alzheimerdemenz auftreten. Hier sterben schon in der Anfangsphase der Krankheit Neurone in diesen Regionen ab.



FREDRIN REINHOLD

Hier justieren die Forscher die Elektroden, mit denen sie die Aktivität von Nervenzellen im entorhinalen Kortex von Ratten messen.

ihrem Ende Botenmoleküle frei: so genannte Neurotransmitter, die das Signal zum nächsten Neuron übertragen.

John O'Keefe vom University College London verwendete solche Mikroelektroden, um Aktionspotenziale im Hippocampus von Ratten zu registrieren. Diese Hirnstruktur spielt eine wichtige Rolle für das Gedächtnis. Wie O'Keefe 1971 berichtete, feuerten manche Nervenzellen in ihr immer dann, wenn sich eine Ratte an einer bestimmten Stelle im Versuchskäfig aufhielt. Er nannte diese Neurone deshalb Ortszellen. Der Forscher beobachtete, dass an verschiedenen Positionen im Käfig jeweils unterschiedliche Ortszellen aktiv wurden und dass das Aktivitätsmuster aller Ortszellen gemeinsam eine Art topografische Karte der Umgebung bildete. Anders ausgedrückt: Anhand des mit Hilfe von mehreren Elektroden erfassten Musters der Ortszellenaktivität lässt sich der jeweilige Aufenthaltsort des Tiers genau bestimmen. O'Keefe und sein Kollege Lynn Nadel – der jetzt an der University of Arizona forscht – schlugen daher 1978 vor, Ortszellen seien ein zentraler Bestandteil der von Tolman postulierten mentalen Karte.

Die Entdeckung der Ortszellen öffnete darüber hinaus erste Einblicke in die am tiefsten liegenden Teile der Großhirnrinde – weit entfernt von den sensorischen Regionen, die Signale der Sinnesorgane empfangen, und vom motorischen Kortex, der Bewegungen steuert. Denn als O'Keefe Ende der 1960er Jahre mit seinen Arbeiten begann, beschränkten sich die Kenntnisse über neuronale Aktivitäten noch überwiegend auf die primären sensorischen Areale, wo Sinneseindrücke wie Licht, Geräusche und Berührungen sie direkt auslösen.

Neurowissenschaftler vertraten damals die Auffassung, der Hippocampus wäre nicht unmittelbar genug mit den Sinnesorganen verbunden, als dass er ihre Signale auf eine Weise verarbeiten könnte, die sich mit Hilfe von Mikroelek-

troden erschließen lasse. Die neu entdeckten Zellen in dieser Hirnstruktur, deren Aktivität die Topografie der Außenwelt repräsentiert, widerlegte die Ansicht auf einen Schlag.

O'Keefes bemerkenswerter Fund wies darauf hin, dass Ortszellen eine Rolle bei der Navigation spielen. Doch es sollte noch Jahrzehnte dauern, bis klar wurde, welche Funktion sie dabei tatsächlich erfüllen. Die Ortszellen liegen in einer Region namens CA1. Dort endet eine Signalkette, die anderswo im Hippocampus ihren Ursprung hat. Man vermutete daher, dass Ortszellen viele für die Navigation entscheidende Informationen aus den übrigen Bereichen des Hippocampus zusammenführen. Zu Beginn des neuen Jahrtausends beschlossen wir beide, diese Hypothese in unserem neuen Labor an der Norwegischen Universität für Wissenschaft und Technologie in Trondheim genauer zu untersuchen. Das Projekt führte uns schließlich zu einer Entdeckung mit weit reichenden Konsequenzen.

Die Nervenzellen feuerten munter weiter

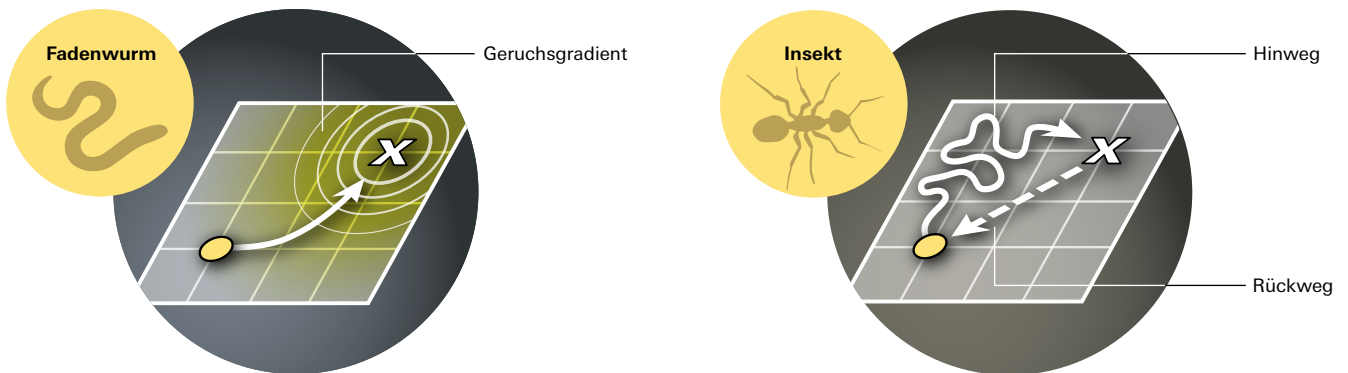
Zusammen mit Menno Witter und einigen höchst kreativen Studenten zeichneten wir per Mikroelektroden die Signale von Ortszellen bei Ratten auf. Zuvor hatten wir aber in deren Hippocampus einen Teil jenes Schaltkreises zerstört, der diesen Neuronen Informationen schickt. Wir waren sicher: Die Experimente würden bestätigen, dass dieser Schaltkreis entscheidend für das korrekte Funktionieren der Ortszellen ist. Doch zu unserer Überraschung feuerten die Neurone munter weiter, sobald die Tiere bestimmte Stellen in ihrer Umgebung erreichten.

Offenbar sind Ortszellen also nicht auf die internen Verknüpfungen des Hippocampus angewiesen, um die Position im Raum zu bestimmen. Wir wandten unsere Aufmerksamkeit daher der einzigen neuronalen Verbindung zu, die wir in unserem Experiment nicht angerührt hatten. Diese führt direkt vom daneben liegenden »entorhinalen Kortex« zur CA1-Region.

Wieder registrierten wir mit Mikroelektroden die neuronale Aktivität, während die Tiere ähnliche Aufgaben ausführten wie bei unseren Studien zu Ortszellen. Diesmal

Wie sich Tiere orientieren

Das Überleben eines Tiers hängt von seiner Fähigkeit ab, sich in seiner Umgebung zu orientieren und zumindest grob abzuschätzen, wo es sich aktuell befindet, wo es herkam und wohin es sich gerade bewegt. Evolutionär höher entwickelte Spezies verfügen über »Pfadintegrationssysteme«, die es ihnen ermöglichen, sich ohne Bezug auf Objekte und Strukturen der Umgebung zurechtzufinden. Säugetiere nutzen ein noch komplexeres System, das mit mentalen Karten arbeitet.



einfach

1 Immer dem Geruch nach

Der einfach gebaute Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* verfügt über das wohl simpelste tierische Navigationssystem. Seine Welt besteht aus Geruchsgradienten. Ausgestattet mit nur 302 Neuronen bewegt er sich auf eine Nahrungsquelle zu, indem er der wachsenden Konzentration von Geruchsstoffen folgt.

2 Ein neuronales GPS

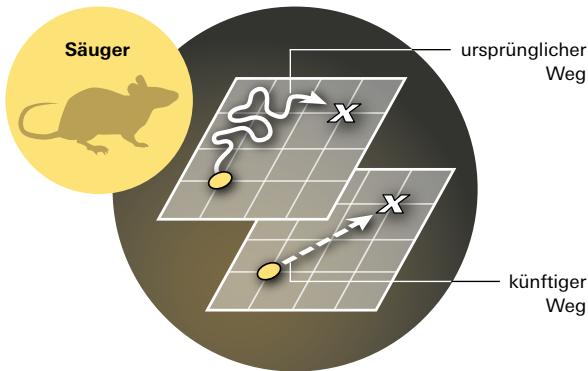
Einige Insekten und andere Gliedertiere sind mit einem erstaunlich effektiven Navigationssystem ausgestattet. Ihr Nervensystem zeichnet die Geschwindigkeit und Richtung ihrer Bewegung relativ zu einem Ausgangspunkt auf. Anhand dieser Informationen gelingt es den Tieren, zum Beispiel einen direkten und damit kürzeren Rückweg zu nehmen, statt der kurvenreichen Route des Hinwegs zu folgen.

steckten die Elektroden aber in einer Region des entorhinalen Kortex, die direkt mit solchen Hippocampusabschnitten verbunden ist, in denen sich laut vorangegangenen Untersuchungen Ortszellen befinden. Ähnlich wie diese feuerten viele Zellen des entorhinalen Kortex, wenn sich ein Tier an bestimmten Stellen im Käfig befand. Doch im Gegensatz zu den Ortszellen taten sie das nicht nur bei jeweils einer einzigen Position, sondern an vielen verschiedenen.

Dabei fiel vor allem die räumliche Verteilung dieser Stellen auf. Das grundlegende Muster entdeckten wir erst 2005, und zwar als wir das Versuchsareal schrittweise erweiterten, in dem wir unsere Experimente durchführten. Ab einer bestimmten Fläche zeigte sich: Die vielen Orte, an denen ein entorhinales Neuron bei einer herumlaufenden Ratte aktiv wird, bilden ein Muster von Sechsecken. Eine solche Zelle – wir taufte sie Gitterzelle (englisch: grid cell) – feuerte stets dann, wenn das Tier einen Eckpunkt dieses hexagonalen Gitters passierte.

Die von den Gitterzellen aufgespannten Sechseckmuster bedeckten die gesamte betrachtete Fläche der Umzäunung. Daher vermuteten wir, dass Gitterzellen im Unterschied zu Ortszellen Informationen über Distanz und Richtung vermitteln. Sie helfen dem Tier, die Änderungen seiner eigenen Position im Raum zu verfolgen, und zwar nur auf Grund innerer Signale, die es den Bewegungen seines Körpers entnimmt. Zusätzliche Informationen aus der Umgebung braucht es dazu nicht.

Daraufhin untersuchten wir die Aktivität von Neuronen in verschiedenen Regionen des entorhinalen Kortex und machten eine faszinierende Entdeckung: In dessen oberem Teil – Fachleute sprechen vom dorsalen, also rückwärts gelegenen entorhinalen Kortex – bilden die Gitterzellen Muster aus recht kleinen Sechsecken. Deren Umfang nahm aber schrittweise zu, je weiter wir uns mit den Elektroden der ventral (bauchwärts) gelegenen Unterseite des entorhinalen Kortex näherten. Offenbar lassen sich in dieser



3 Landkarten im Kopf

Säugetiere haben ein besonders raffiniertes Orientierungssystem entwickelt. Spezialisierte Neurone in ihrem Gehirn feuern in Mustern, die zurückgelegte Wegstrecken repräsentieren. Gemeinsam erzeugen diese Neurone mentale Karten der Außenwelt. Die Tiere speichern Erinnerungen an die Routen und verwenden sie zum Planen künftiger Unternehmungen.

Hirnregion einzelne Module abgrenzen, deren Gitterzellen Karten mit jeweils unterschiedlicher Auflösung erzeugen. Die Maschenweite in benachbarten Modulen unterschied sich dabei regelmäßig um das etwa 1,4-Fache – also ungefähr der Quadratwurzel aus 2. Im obersten Modul des entorhinalen Kortex waren die Ecken eines Gittersechsecks ungefähr 30 bis 35 Zentimeter voneinander entfernt. Im nächstunteren Modul erreichte die Kantenlänge 42 bis 49 Zentimeter und so weiter, bis im untersten der Abstand der Eckpunkte mehrere Meter betrug.

Wir waren begeistert von der Entdeckung der Gitterzellen und ihrer klaren Organisation. In den meisten Regionen der Hirnrinde erscheinen die neuronalen Aktivitätsmuster nämlich chaotisch und kaum interpretierbar. Hier im entorhinalen Kortex fanden wir endlich ein System von Neuronen, die vorhersehbar und geordnet feuerten. Das wollten wir unbedingt genauer untersuchen. Doch sind Gitter- und Ortszellen nicht die einzigen Neurone, die Säugetiere zur

Kartierung ihres Lebensraums nutzen – wir sollten weitere Überraschungen erleben.

Bereits in den 1980er und frühen 1990er Jahren hatten James B. Ranck und Jeffrey S. Taube vom Downstate Medical Center der State University of New York (SUNY) Neurone beschrieben, die feuern, wenn der Kopf eines Nagetiers in eine bestimmte Richtung weist. Diese Zellen lagen im Präsubiculum, einem weiteren Nachbarn des Hippocampus in der Hirnrinde. Wir entdeckten nun solche »Kopfrichtungszellen« auch im entorhinalen Kortex, eingestreut zwischen Gitterzellen. Viele arbeiteten sogar wie diese: Die Stellen, an denen sie aktiv wurden, bildeten ebenfalls ein Maschengitter; allerdings feuerten sie nur, wenn sich das Tier in eine bestimmte Richtung orientierte. Solche Zellen dienen also als eine Art Kompass in der jeweiligen Umgebung, haben aber nichts mit dem Erdmagnetfeld zu tun.

Anhand der Aktivität weniger »Geschwindigkeitszellen« können Forscher bestimmen, wie schnell das Tier läuft

Einige Jahre später, 2008, spürten wir im entorhinalen Kortex einen weiteren Neuronentyp auf. Diese »Grenzzellen« feuern, wenn das Tier sich einer Wand oder einem anderen Hindernis nähert. Offenbar berechnen sie, wie weit es davon entfernt ist.

2015 trat schließlich ein fünfter Typ von Orientierungszelle auf den Plan. Diese Neurone reagieren auf die Geschwindigkeit, mit der sich ein Tier bewegt, und zwar unabhängig von dessen aktueller Position und Bewegungsrichtung. Ihre Feuerrate nimmt proportional zum Tempo der Fortbewegung zu. Wir konnten sogar an der Aktivität einer Hand voll solcher »Geschwindigkeitszellen« ablesen, wie schnell sich ein Tier gerade bewegt. Zusammen mit den Kopfrichtungszellen könnten die Geschwindigkeitszellen die Aufgabe erfüllen, den Gitterzellen fortlaufend aktualisierte Informationen über die Positionsveränderungen des Tiers zu liefern, genau gesagt zu Tempo, Bewegungsrichtung und Distanz vom Ausgangspunkt.

Die Gitterzellen hatten wir entdeckt, als wir untersuchten, auf Grund welcher Informationen die Ortszellen ein inneres Bild von der Umgebung entwickeln. Heute wissen wir, dass Letztere Signale verschiedener Zelltypen des entorhinalen Kortex integrieren, um die bisherige Route und die aktuelle Bewegungsrichtung zu erfassen. Doch das ist noch nicht die ganze Wahrheit darüber, wie Säugetiere navigieren.

Anfangs konzentrierten wir uns auf den medialen (zentralen) Anteil des entorhinalen Kortex. Ortszellen könnten aber auch Signale von dessen lateralen (seitlichen) Regionen

JEN CHRISTIANSEN; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



FOTOLIA / GIORDANO AITA

erhalten, die bereits vorverarbeitete Informationen von verschiedenen Sinnessystemen weiterleiten, unter anderem über Gerüche oder die Identität von Objekten. Auf diese Weise führen Ortszellen Signale aus den unterschiedlichsten Hirnregionen zusammen. In unserem Labor wie auch an anderen Instituten wird derzeit die komplexe Interaktion der im Hippocampus ankommenden Signale und die Bildung ortsspezifischer Gedächtnisinhalte erforscht – und zweifellos auch noch die nächsten Jahre.

Wie lässt sich herausfinden, wie die räumlichen Karten des entorhinalen Kortex und des Hippocampus bei der Orientierung im Raum zusammenarbeiten? Etwa indem man schaut, worin sie sich unterscheiden – beispielsweise in ihrer Anpassungsbereitschaft. John L. Kubie und der 2013 verstorbene Robert U. Muller vom SUNY Downstate Medical Center zeigten in den 1980er Jahren, dass komplett neue von Ortszellen erzeugte Karten im Hippocampus entstehen können, wenn das Tier in eine andere Umgebung gelangt. Dafür genügte bereits eine unterschiedliche Wandfarbe am selben Ort im selben Raum.

In unseren Laboren ließen wir Ratten in bis zu elf verschiedenen Umzäunungen nach Futter suchen. Für jede davon konstruierten die Tiere rasch eine eigenständige Karte. Das stützt die Hypothese, wonach der Hippocampus unterschiedliche Modelle erstellt, die zur jeweiligen spezifischen Umgebung passen.

Dagegen sind die Karten des medialen entorhinalen Kortex universell: Feuern Gitter-, Kopfrichtung- und Grenzzellen an bestimmten Positionen in einer Umgebung gemeinsam, werden sie in einem anderen Umfeld an analogen Orten aktiv – ganz so, als würden die Koordinaten einfach

auf die neue Situation übertragen. Bewegt sich beispielsweise das Tier in einem Raum Richtung Nordosten, feuern Zellen in der gleichen Abfolge, wie wenn es in einem anderen Raum in diese Richtung läuft.

Das Gehirn nutzt zum Orientieren also das Muster neuronaler Signale im entorhinalen Kortex. Diese Daten kommen dann in den Hippocampus, der damit eine spezifische Karte für die jeweilige Umgebung erstellt. Aus evolutionärer Sicht ist die Verwendung zweier Kartensysteme, die ihre Informationen integrieren, eine effiziente Lösung für ein Navigationssystem. Die Gitter des entorhinalen Kortex, die Distanz und Richtung bestimmen, bleiben bei wechselnder Umgebung gleich. Dafür erstellen die Ortszellen des Hippocampus eine spezifische Karte für jeden einzelnen Raum.

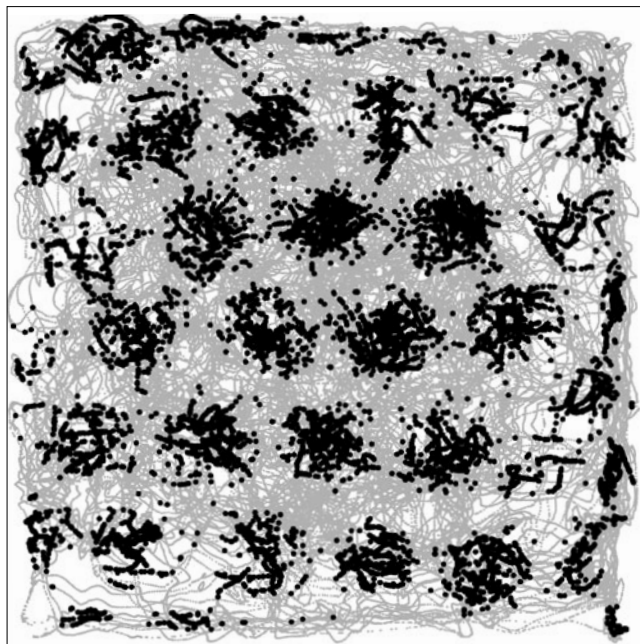
Noch ist die Funktionsweise des neuronalen Navigationssystems nicht vollständig verstanden. Praktisch unser gesamtes Wissen über Orts- und Gitterzellen stammt von Aufzeichnungen neuronaler Aktivität, während ein Tier in einer artifiziiellen Umwelt umherläuft – in Kästen mit ebenem Boden, die kaum als Orientierungspunkte geeignete Strukturen aufweisen.

Nach jeder Haarnadelkurve im Labyrinth erstellt das Gehirn ein neues Gittermuster

Diese Laborbedingungen unterscheiden sich drastisch von natürlichen Umgebungen, die sich laufend verändern und zahllose dreidimensionale Objekte enthalten. Arbeiten dort Orts- und Gitterzellen überhaupt auf die gleiche Weise? Experimente in komplexen Labyrinthen lieferten erste Erkenntnisse über die Funktion des neuronalen Navi in einer Umwelt, die dem natürlichen Lebensraum näherkommt. So zeichneten wir 2009 die Aktivität von Gitterzellen auf, während sich die Tiere durch ein Labyrinth bewegten, in dem am Ende jedes Wegs eine Haarnadelkurve zum nächsten Gang führt. Wie erwartet, erzeugten die Gitterzellen für jeden Gang hexagonale Muster, mit denen die Tiere die darin zurückgelegte Distanz kartierten. Nach jeder Kehrtwendung in einen neuen Gang erstellte das System ein komplett neues Gittermuster, als ob das Tier einen ganz anderen Raum betreten hätte.

Spätere Untersuchungen in offeneren Umgebungen ergaben, dass die Kartengitter in kleinere Abschnitte zerfallen, sobald der verfügbare Raum eine gewisse Größe überschreitet. Derzeit untersuchen wir, wie sich diese individuellen Teilkarten dann zu einer integrierten Karte eines größeren Areals zusammenfügen. Doch die experimentellen Bedingungen, unter denen wir diese Studien durchführen, sind gegenüber den natürlichen Verhältnissen immer noch stark vereinfacht: Die Versuchsräume sind flach und völlig eben. Beobachtungen anderer Arbeitsgruppen an fliegenden Fledermäusen oder in Käfigen herumkletternden Ratten ergaben erste Anhaltspunkte zur Navigation in dreidimensionalen Umgebungen: Orts- und Kopfrichtungszellen feuern auch hier nur an bestimmten Positionen; Ähnliches gilt vermutlich für Gitterzellen.

Das Navigationssystem des Hippocampus leistet jedoch noch weit mehr, als den Weg von A nach B zu finden. Es empfängt nämlich nicht nur Informationen zur Position, Distanz und Richtung aus dem medialen entorhinalen



Die schwarzen Punkte markieren jene Stellen im zwei mal zwei Meter großen Gehege, an denen eine bestimmte Rasterzelle der untersuchten, frei umherlaufenden Ratte feuert (grau: die Laufstrecke der Ratte). Diese Orte bilden bienenwabenartige, hexagonale Muster.

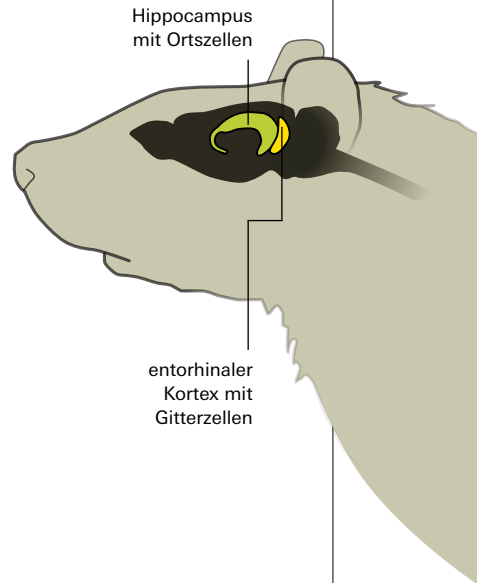
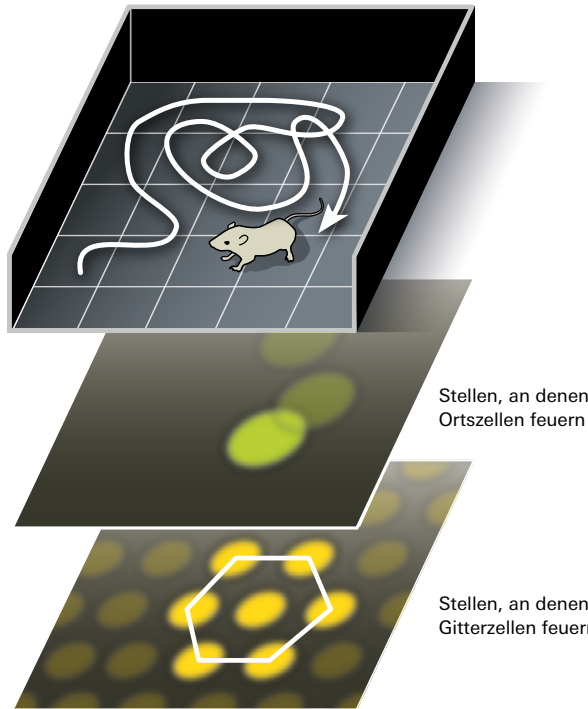
MIT FRIEDL. GEN. VON EDWARD I. MOSER, STENSJÖ, H. ET AL.: THE ENTORHINAL GRID MAP IS DISCRETIZED. IN: NATURE 462, S. 72-76, 2012, FIG. 1C

Neuronale Kartografie

Seit den 1930er Jahren vermuten Neurowissenschaftler, dass Säugetiergehirne mentale Karten erstellen, welche die räumliche Geometrie der Außenwelt repräsentieren. Inzwischen haben sie Nervenzellen identifiziert, deren koordiniertes Feuern solche Karten hervorbringt.

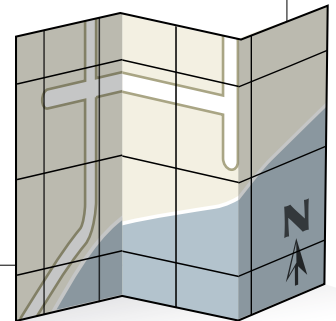
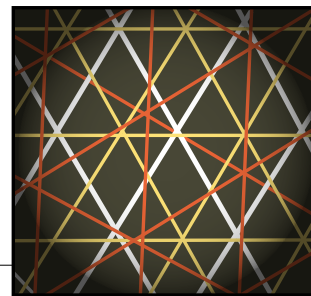
Orts- und Gitterzellen

Ein entscheidender Fortschritt gelang 1971 mit der Entdeckung der Ortszellen im Hippocampus der Ratte. Im Jahr 2005 entdeckten die Autoren dieses Artikels dann die Gitterzellen, die dem Tier ein Gefühl für seine Position und seine Bewegungen im Raum vermitteln. Jede Gitterzelle feuert an verschiedenen Stellen im Raum, die sich als Eckpunkte von Sechsecken darstellen lassen.



Eine mentale Karte entsteht

Die Aktivität von Gitterzellen produziert eine Karte (rechts), die einer geografischen Landkarte ähnelt (ganz rechts). Zusammen mit Ortszellen, welche die Position des Tiers in der jeweiligen Umgebung feststellen, erlauben Gitterzellen damit eine akkurate mentale Darstellung der Umwelt.



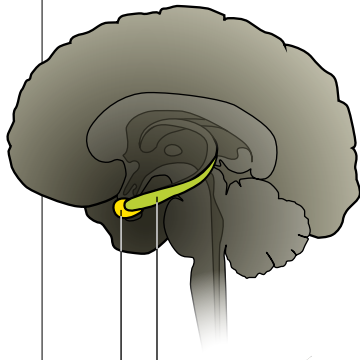
Kortex, sondern zeichnet auch Objekte auf, die sich an einem bestimmten Ort befinden, und speichert Ereignisse, die dort stattgefunden haben. Das von den Ortszellen erstellte Modell der Umgebung enthält also Daten nicht nur über den Aufenthaltsort, sondern auch zu den Erfahrungen des Tiers – ähnlich wie es Tolman in seinem Konzept einer mentalen Karte postuliert hatte. Einige der zusätzlichen Informationen stammen von Neuronen des lateralen (seitlichen) entorhinalen Kortex. Dabei verknüpfen sich Details zu Objekten und Ereignissen mit den Koordinaten der Karte und werden als Gedächtnisinhalte abgelegt. Wird diese Erinnerung später aufgerufen, sind sowohl das Ereignis als auch seine Position auf der Karte wieder präsent.

Diese Kopplung von Orten und Erinnerungen ist vergleichbar mit einer Lerntechnik, die bereits die alten Griechen und Römer nutzten: der Loci-Methode. Sie erleichtert es, Listen von Einzelinformationen zu memorieren, indem der Lernende jedes einzelne Wort im Geist an einer bestimmten Stelle auf einem vertrauten Weg durch ein Haus oder eine Landschaft ablegt. Teilnehmer von Gedächtniswettbewerben verwenden diese Technik, um sich lange Abfolgen von Zahlen, Buchstaben oder Spielkarten zu merken.

Leider gehört der entorhinale Kortex zu den ersten Hirnarealen, deren Funktion bei der Alzheimerdemenz versagt: Die Neurone in diesem Teil der Hirnrinde sterben ab, weshalb eine Volumenabnahme des entorhinalen Kortex auf ein

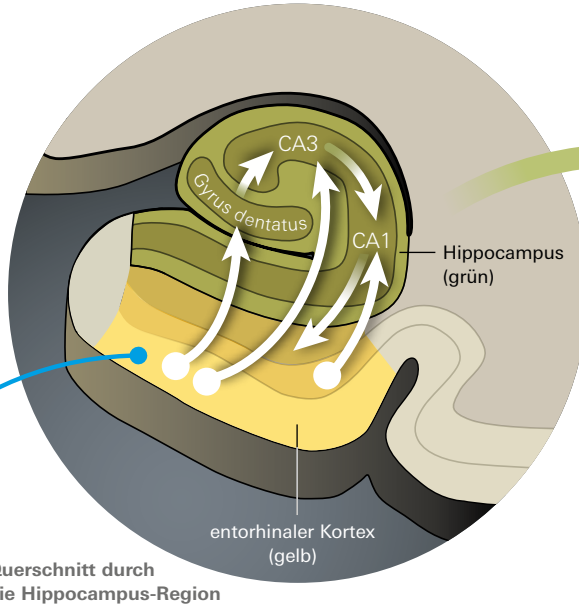
Das Navi in unserem Kopf

Das neuronale Navigationssystem von Säugern liegt tief in einer Hirnregion, die als medialer Schläfenlappen bezeichnet wird. Zwei Areale sind dabei besonders wichtig: der entorhinale Kortex und der Hippocampus.



Hippocampus
(enthält die Ortszellen)

entorhinaler Kortex
(enthält die Gitterzellen)

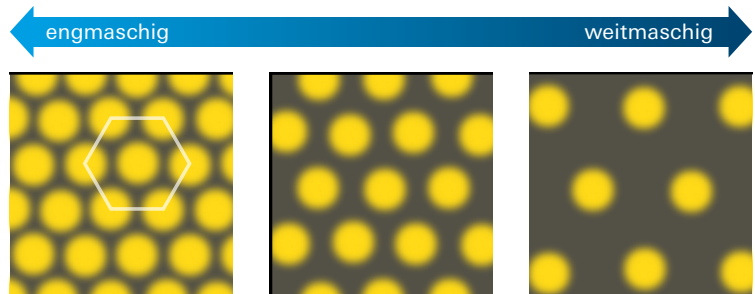


Datenstrom zum Hippocampus

Der entorhinale Kortex leitet Informationen zur Bewegungsrichtung und zurückgelegten Distanz von den Gitterzellen an den Gyrus dentatus und die Areale CA3 und CA1 des Hippocampus. Diese erstellen eine mentale Karte für die optimale Planung zukünftiger Positionsveränderungen.

Die Gitterzellen im entorhinalen Kortex

Die Stellen, an denen eine Gitterzelle aktiv wird, bilden bienenwabenartige Muster von Sechsecken. Deren Maschenweite vergrößert sich im entorhinalen Kortex von oben (dorsal) nach unten (ventral) schrittweise. In seiner obersten Schicht wird eine Gitterzelle wieder aktiv, wenn sich das Tier etwa 30 bis 35 Zentimeter von ihrem ersten Feuerort entfernt hat. Für die Neurone in der untersten Schicht hingegen muss es dafür einige Meter zurücklegen.



Andere spezialisierte Zellen im entorhinalen Kortex ...

... senden Informationen über Kopforientierung, Geschwindigkeit und Abstand zu Hindernissen an den Hippocampus. All diese Daten fließen in eine detaillierte, komplexe Karte der Umgebung ein.



May-Britt Moser kümmert sich eingehend und liebevoll um eine ihrer Laborratten, bevor sie die neuronale Aktivität im entorhinalen Kortex des Tiers untersucht. Die Erfahrung zeigt, dass solche Zuwendung auch die Kooperation der Ratten verbessert.

erhöhtes Alzheimerisiko hindeutet. Entsprechend gilt orientierungsloses Umherirren als ein frühes Anzeichen der Alzheimerdemenz. In den späteren Stadien sterben dann auch Zellen des Hippocampus ab. Dadurch können sich die Patienten nicht mehr an Ereignisse erinnern oder an abstrakte Konzepte, wie zum Beispiel Farbbezeichnungen. Einer aktuellen Untersuchung zufolge funktionieren die Gitterzellnetzwerke schlechter bei jungen Menschen mit einer Genvariante, die das Alzheimerisiko erhöht. Das könnte auch neue Möglichkeiten zur Frühdiagnose der Krankheit eröffnen.

Mehr als 80 Jahre nachdem Tolman erstmals postulierte, dass unser Gehirn eine mentale Karte der Umwelt erstellt, wissen wir nun: Ortszellen sind nur eine Komponente eines komplexen Systems des Gehirns zum Abbilden der räumlichen Umgebung mit dem Ziel, Position, Distanz, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung zu bestimmen. Die hierfür benötigten Zelltypen haben Forscher inzwischen auch bei Fledermäusen, Affen und beim Menschen nachgewiesen. Dass sie bei ganz verschiedenen Säugergruppen vorkommen, legt nahe, dass diese Zellen schon früh in der Evolution der Säugetiere entstanden und ähnliche neuronale Funktionsprinzipien nutzen.

Das System zur räumlichen Darstellung der Umgebung gehört bereits zu den am besten verstandenen Netzwerken in der Hirnrinde der Säugetiere. Auch die Algorithmen, mit denen es arbeitet, sind zum Teil schon identifiziert. Wie so oft werfen die neuen Entdeckungen aber auch weitere Fragen auf. Zwar wissen wir jetzt, dass unser Gehirn Karten der Umwelt erstellt. Es ist jedoch noch unklar, wie deren Einzelkomponenten zusammenwirken, um ein kohärentes Gesamtbild zu erstellen, und wie andere Hirnteile auf Grund dieser Informationen über Ortsveränderungen und geeignete Routen entscheiden.

Viele andere Fragen sind ebenfalls noch offen. Gilt beispielsweise das neuronale Kartensystem des Hippocampus und des entorhinalen Kortex nur für die nähere Umgebung? Oder verwenden Tiere ihre Orts- und Gitterzellen auch über weitere Distanzen, etwa wenn Fledermäuse bei ihren Wanderungen Hunderte oder Tausende von Kilometern zurücklegen? Unsere bisherigen Untersuchungen mit Nagern können das nicht beantworten, denn dort beschränkten wir uns auf einen Radius von wenigen Metern.

Nicht zuletzt fragen wir uns natürlich, wie und wann Gitterzellen entstehen, ob es dafür eine kritische Phase in der Hirnentwicklung gibt und ob andere Wirbeltiere ebenfalls über ein ähnliches System aus Ortszellen und Gitterzellen verfügen – oder gar Wirbellose? In letzterem Fall wäre dieses Prinzip der neuronalen Kartierung bereits hunderte Millionen Jahre alt. Eines lässt sich aber mit Sicherheit sagen: Das Navigationssystem in unserem Gehirn wird die Forscher noch für Jahrzehnte beschäftigen. ◀



FRÉDÉRIK REINHOLD

QUELLEN

Moser, E. I. et al.: Grid Cells and Cortical Representation. In: Nature Reviews Neuroscience 15, S. 466–481, 2014

Moser, E. I.: Grid Cells and the Entorhinal Map of Space. Vortrag zur Verleihung des Nobelpreises, 7. Dezember 2014. www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2014/edvard-moser-lecture.html

Moser, M.-B.: Grid Cells, Place Cells and Memory. Vortrag zur Verleihung des Nobelpreises, 7. Dezember 2014. www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2014/may-britt-moser-lecture.html

WEBLINK

www.sciviews.de/video/wie-orientieren-sich-ratten-im-raum
Dieses knapp zehnminütige Video stellt das Forscherehepaar Moser und seine Arbeiten vor.

SYMBIOSE TINTENFISCH MIT TASCHENLAMPE

Symbiotische Leuchtakterien verhelfen der Stummelschwanzsepie *Euprymna scolopes* im Gegenlicht zu perfekter Tarnung. Dieses Zusammenleben beruht auf einer ausgeklügelten molekularen Kommunikation.

MARGARET MCFALL-NGAI, PACIFIC BIOSCIENCES RESEARCH CENTER (PBRC), UNIVERSITY OF HAWAII AT MANOA; MIT FROL. GEN. VON LARISSA TETSCH



Die Hawaiianische Stummelschwanzsepie (*Euprymna scolopes*) lebt in flachen Gewässern vor Hawaii. Der nur fünf Zentimeter große Zwergtintenfisch beherbergt in seinem Leuchtorgan Licht produzierende Bakterien, welche die Bauchseite hell erscheinen lassen. Sein Umriss löst sich dadurch in schwachem Gegenlicht optisch auf, was ihn während der nächtlichen Jagd auf Kleinkrebse vor Fressfeinden schützt. Links und oben erkennt man den Flossensaum am Körper, rechts die zusammengelegten Fangarme, unten den Trichter.

Wer bei Tintenfischen nur an die Kolosse der Tiefsee denkt, übersieht ein faszinierendes Tier: die Hawaii-anische Stummelschwanzsepie, *Euprymna scolopes*. Der nur daumengroße Zwergtintenfisch kommt in den flachen Gewässern des Hawaiiarchipels vor und lebt mit Leuchtbakterien in Symbiose. Tagsüber verstecken sich die Tiere im Sediment und tarnen sich dabei mit kleinen Steinchen, die sie sich mit einem Sekret auf den Rücken kleben. Doch spätabends und nachts begeben sie sich auf die Jagd nach Kleinkrebsen. Nun nutzen sie eine andere Form der Tarnung: die Gegenschattierung. Bei vielen Tieren, darunter Fischen, ist der Bauch heller als der Rücken, so dass sie gegen den Himmel oder die hellere Wasseroberfläche schlecht zu sehen sind.

Der Tintenfisch perfektioniert diesen Trick mit Hilfe von Licht produzierenden Bakterien, die er in seinem Leuchtorgan hält – einem System von blind endenden Kammern an seiner Bauchseite. Er steuert deren Helligkeit sogar präzise nach dem von oben einfallenden Mond- und Sternenlicht. Die Wirkung ist beinahe so, als trüge er eine Tarnkappe.

Die Lichtproduktion – Biolumineszenz – übernimmt das symbiotische Bakterium *Vibrio fischeri* (in neuerer Nomenklatur *Aliivibrio fischeri*). Dieser Verwandte des Choleraerregers verursacht keine Krankheiten, sondern lebt entweder frei im Wasser oder in Gesellschaft mit Kleinkrebsen und anderen Meerestieren. Hawaiianische Stummelschwanzsepiesen sind in der Natur immer damit besiedelt. Sie nehmen die Mikrobe, die in ihrer Umgebung allgegenwärtig ist, sofort nach dem Schlüpfen auf. Dabei unterscheiden sie von Anfang an streng zwischen *V.-fischeri*-Bakterien und anderen Arten, die das Leuchtorgan nicht besiedeln können. Selbst nichtleuchtende *V.-fischeri*-Bakterien werden zügig wieder ausgemerzt. Wie dies genau geschieht, ist allerdings noch unklar.

Seit fast drei Jahrzehnten erforschen die amerikanische Zoologin Margaret McFall-Ngai und der Mikrobiologe Edward Ruby gemeinsam das Zusammenspiel zwischen diesem kleinen Tintenfisch und seinem Leuchtbakterium – bisher an der University of Wisconsin in Madison und jetzt in Honolulu an der University of Hawaii. Mit ihren Mitarbeitern entdeckten sie Schritt für Schritt, wie diese Symbiose im Einzelnen funktioniert: wie Mikrobe und Wirt sich verständigen, gegenseitig manipulieren und aus ihrem Verhältnis Nutzen ziehen. McFall-Ngai war eine der Ersten, die erkannten, welche große Bedeutung die »normale« Besiedlung mit Mikrolebewesen – dem so genannten Mikrobiom – für höhere Organismen hat. Ihre Forschergruppe nutzt die enge Symbiose, deren Mechanismen sie eingehend untersucht, als Modell zur Aufklärung der symbiotischen Beziehungen zwischen Mikrobiom und Wirt.

Schon vor Längerem hatte das Team herausgefunden, dass die jungen Sepiesen die Leuchtbakterien regelrecht aus dem Wasser fischen. Die Wissenschaftler identifizierten bestimmte Zuckermoleküle, mit denen die Bakterien ihre Anwesenheit signalisieren. Es handelt sich dabei um Bruchstücke ihrer Zellwand. Daraufhin sondert der Tintenfisch

einen klebrigen Schleim ab, an dem die Mikroben haften bleiben, und strudelt sie dann mit Flimmerhärchen auf der Oberfläche seines Leuchtorgans zu Poren, durch die sie in dieses einwandern.

Rasche Besiedlung schon am ersten Lebenstag

Gleichzeitig produziert das Tier in den Kammern seines Leuchtorgans einen Lockstoff, den Zucker Chitobiose, der den Mikroben den Weg in sie hinein weist. Dort siedeln sich die neuen Bewohner unverzüglich an und vermehren sich rasch. Bereits binnen Stunden haben sie die kritische Dichte erreicht, ab der sie – unterstützt durch bestimmte Maßnahmen des Wirts (siehe unten) – zu leuchten beginnen. Ihre Zelldichte erkennen sie durch so genanntes »Quorum Sensing«. Dazu messen sie in ihrer Umgebung die Konzentration spezieller von ihnen abgegebener chemischer Substanzen. Erst oberhalb eines Schwellenwerts sind sie zur Lichtproduktion bereit.

Sobald alle Kammern besiedelt sind, lässt der Tintenfisch sein Leuchtorgan ausreifen: Er bildet jetzt sämtliche Strukturen zum Einfangen von Bakterien zurück. Auch dies geschieht wieder auf ein bakterielles Signal hin.

Aber wie signalisiert *V. fischeri* dem jungen Tintenfisch seine Anwesenheit? Das konnten die Forscher nun genauer aufklären: Die Mikrobe verpackt die als Signal dienenden Zuckerverbindungen in kleine Membranbläschen, so genannte Vesikel, die sie von ihrer Zellhülle abschnürt. Wie Experimente in Aquarien zeigten, können schon die bakteriellen Zuckermoleküle allein die Reifung des Leuchtorgans auslösen, ohne dass die Mikroben selbst anwesend sein müssen. Nach den neuesten Studien geschieht das in bakterienfreiem Wasser bei einer hohen Konzentration der besagten Membranbläschen noch schneller als durch die Bakterien selbst. Denn während Letztere erst in die Kammern einwandern, sich vermehren und die Vesikel produzieren müssen, gelangen die Membranbläschen direkt durch Diffusion an die richtigen Stellen im Leuchtorgan, wo sie seine Reifung auslösen.

Kürzlich stieß das amerikanische Forscherteam auf einen weiteren, auch medizinisch interessanten Zusammenhang mit den Membranbläschen. Wie viele bewegliche Bakterien besitzt *V. fischeri* Geißeln: lange, gewundene Proteinfäden, die wie winzige Propeller durch Rotation Antrieb erzeugen. Einige davon sind vollständig von der äußeren Membran der Bakterienhülle ummantelt, andere nackt. Wozu der Mantel dient, war bisher weitgehend unklar. Neben einer Schutzfunktion für die Geißel vermuteten Forscher bisher, dass er die Fadenproteine gegenüber dem Immunsystem des Wirts abschotten soll.

Die Gruppe um McFall-Ngai und Ruby zeigte nun: Erstens fördern speziell ummantelte Geißeln die Vesikelbildung, und zweitens stellen die Leuchtbakterien nur bei gut schlagenden ummantelten Geißeln ausreichend Membranbläschen her. Wenn sie keine oder kaum bewegliche Geißeln besitzen, bilden sie davon deutlich weniger. Manipuliert man die Bakterien hingegen so, dass sie besonders viele ummantelte

Proteinfäden tragen, produzieren sie sogar mehr Vesikel als normal. Der Mechanismus der Vesikelbildung ist noch nicht aufgeklärt; da aber die Geißeln sehr schnell rotieren, könnten Scherkräfte an der Membranhülle daran beteiligt sein.

In der medizinischen Forschung findet dieser Befund Beachtung, weil viele Krankheitskeime ebenfalls ummantelte Geißeln tragen, so der Choleraerreger *Vibrio cholerae* oder *Helicobacter pylori*, das Magengeschwür und in deren Folge manchmal Magenkrebs auslösen kann.

Wie eingangs erwähnt, steuert der Tintenfisch die Lichtintensität seines Leuchtorgans am Bauch sehr genau. Auch diese Regulation beruht auf einem mehrstufigen »Zwiegespräch« zwischen Wirt und Untermietern, den die Forscher erst seit Kurzem genauer verstehen. Weil das Tier nur nachts jagt, muss es die Mikroben nur in dieser Zeit zum Leuchten bringen, also dafür Energie aufwenden. Als Erstes »füttern« spezielle Zellen seines Immunsystems die Leuchtbakterien abends und zu Beginn der Nacht mit Zuckermolekülen. Die Bakterien scheiden daraufhin als Abfallstoffe Säuren ins Innere des Leuchtorgans aus. Diese Ansäuerung wiederum bewirkt, dass vermehrt Sauerstoff, den der Tintenfisch mit seinem Blutfarbstoff anliefern, in die Kammern abgegeben wird.

Die Lichtemission ist im Grunde ein Nebeneffekt einer Oxidation: Unter Sauerstoffverbrauch setzt ein Luziferase genanntes Enzym eine chemische Substanz, ein »Luziferin«, um. Dabei wird Energie in Form von Licht frei. Somit bestimmt letztlich die Verfügbarkeit von Sauerstoff die Biolumineszenz. Das heißt: Je besser der Tintenfisch seine Bakterien füttert – und je mehr Sauerstoff er ihnen schließlich zur Verfügung stellt –, desto mehr leuchten sie.

Das Tier kann die durch die Bakterien produzierte Lichtmenge im Leuchtorgan sogar messen und dadurch mit dem über die Augen wahrgenommenen Außenlicht abgleichen. Im Leuchtorgan wird das Licht dabei unter anderem über ein Sehpigment wahrgenommen, das dem Rhodopsin (Sehpurpur) im menschlichen Auge ähnelt.

Die vielen ausgeklügelten Mechanismen dieser Symbiose zwischen einem Tintenfisch und einem Leuchtbakterium liefern auch jetzt noch fortlaufend entscheidende neue Erkenntnisse über die molekularen Raffineszenzen in solchen Systemen. Sie zeigen, wie geschickt die Partner ihre Möglichkeiten ausloten und ihren eigenen Lebensraum gestalten. ◀

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

QUELLEN

Aschtgen, M.-S. et al.: *Vibrio fischeri*-Derived Outer Membrane Vesicles Trigger Host Development. In: *Cellular Microbiology* 18, S. 488–499, 2016

Aschtgen, M.-S. et al.: Rotation of *Vibrio fischeri* Flagella Produces Outer Membrane Vesicles that Induce Host Development. In: *Journal of Bacteriology* 198, S. 2156–2165, 2016

Schwartzman, J.A. et al.: The Chemistry of Negotiation: Rhythmic, Glycan-Driven Acidification in a Symbiotic Conversation. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 112, S. 566–571, 2015

INTERNET FORSCHER BRINGEN LICHT INS DARKNET

Konzipiert als Gegenentwurf zum gläsernen Internet, gilt das Darknet inzwischen als Marktplatz für illegale Waren und Dienstleistungen. Aber wie viel Kriminalität steckt tatsächlich in dieser Parallelwelt?

Die Waffe, mit der David S. bei seinem Amoklauf am 22. Juli 2016 neun Menschen und zuletzt sich selbst erschoss, soll aus den Tiefen des Darknets stammen. Auf seinem Computer fanden sich Hinweise, dass er dort in geschützten Chatforen nach einer Pistole suchte. Inzwischen ist der mutmaßliche Lieferant gefasst; ob er die Waffe besorgt hat, wird sich aber nur schwer nachweisen lassen (Stand 28. August 2016). Denn das anonyme Darknet verwischt die Spuren seiner Akteure. Es gilt den einen als nahezu rechtsfreier Raum für Kriminelle, anderen wiederum als Bereich, in dem Dissidenten, politische Aktivisten und Whistleblower ungehindert und ohne Angst vor Verfolgung Informationen austauschen oder anbieten können.

Als technische Grundlage hat sich die kostenlos downloadbare Software der US-amerikanischen Organisation »The Tor Project« durchgesetzt. Darauf basierende Internetbrowser ermöglichen vor allem anonymes Surfen, da sie jede Anfrage über mehrere global verteilte Internetknoten leiten und so die IP-Adresse des Nutzers verbergen. Pro Tag nutzen derzeit knapp 1,6 Millionen Menschen diese Möglichkeit.

Wer in diesem Netz im Netz selbst Inhalte anbieten möchte, muss sich lediglich einen Server einrichten und den dann mit der Tor-Software verbinden. Anders als im normalen Netz wählt man seine Webadresse jedoch nicht selbst aus. Stattdessen wird sie von der Tor-Software erzeugt und besteht aus einer kryptischen Kombination von Zeichen, etwa `mp3t35sjunnxf76.onion`. Die Endung hat einen einfachen Grund: Die Entwickler konzipierten die Architektur von Tor als Zwiebelnetzwerk, basierend auf mehreren übereinanderliegenden Schichten. Herkömmliche Browser wie Firefox oder Suchmaschinen wie Google entdecken .onion-Seiten nicht.

Ein zentrales Verzeichnis der Adressen existiert freilich nicht, jeder Knoten des Netzwerks kennt nur einen kleinen Teil der Gesamtheit. Das gemeinnützige Tor-Projekt, dessen Ziel es ist, im Internet demokratische Freiheit durch Anonymität zu schaffen, bittet daher die Knotenbetreiber um Mitarbeit. Etwa die Hälfte meldet eine ungefähre Anzahl der Adressen der letzten 24 Stunden zurück. Bezogen auf die Gesamtarchitektur des Netzwerks ergibt sich so ein tagesaktueller Wert aktiver .onion-Seiten von zurzeit knapp unter 60 000. Laut der Stiftung gehen etwa vier Prozent der Tor-Nutzer auf diese Seiten, die große Mehrheit beschränkt sich darauf, unerkannt zu surfen.



**WIR MACHEN
SIE STARK.**

Das
IMMUNSYSTEM
Ein innovativer Schlüssel
gegen Krebs.

Unser Immunsystem ist wohl eines der stärksten Instrumente im Kampf gegen Krebs. Genau darauf setzt ein neues und innovatives Therapieprinzip: Die Immunonkologie. Sie versetzt unser Immunsystem wieder in die Lage, die Krebszellen zu erkennen und anzugreifen.

www.immunonkologie.de



PICTURE ALLIANCE (ORS) / FOTO MIT BESCHLÄGELICHEN BEWISSEN: TOR BEZIEHT SICH ÜBER JOURNALIST WOLFGANG WILHELM (UNTER DER ÜBERSCHRIFT DES INTERNET - ANGEBOHTEN WIRD HIER ALLES: VON AUFRAGSBOJDER, ÜBER DRUGEN, WAFFEN (FOTO) ÜBER TORHÄNDLER NICHTS ILLEGALES SICHEN UNMÖGLICH)

Waffen, Drogen, pornografische Videos, sogar Mordaufträge – das Darknet gilt als Tummelplatz für den Handel mit illegalen Waren und kriminellen Dienstleistungen. Die benötigte Software diente ursprünglich aber einem ganz anderen Zweck: Whistleblower und politisch Verfolgte sollten in einem geschützten Bereich im Netz anonym kommunizieren können.

Wissenschaftler, die gezielt nach .onion-Seiten suchen, entdecken eine Einkaufsmeile, die der legalen Netzwirtschaft überraschend ähnelt. Man findet Kunden-werben-Kunden-Programme und Kommentare zu Produkten und Händlern. Bezahlt wird in Bitcoins, um die Anonymität von Käufern und Verkäufern zu gewährleisten. Viele Marktplätze folgen Regeln, verbieten beispielsweise den Handel mit Waffen, Gift oder menschlichen Organen. Etliche bieten illegale Produkte an, von verschreibungspflichtigen Medikamenten über Falschgeld zu diversen Drogen. Derzeit gibt es nach Auskunft des Bundeskriminalamts hier zu Lande 80 Verfahren wegen Waffen- und Sprengstoffhandels im Darknet, der Drogen- und Falschgeldhandel gilt aber als deutlich umfangreicher. Obendrein seien viele Waffenangebote Schwindel, bei denen die Käufer ihr Geld überweisen, die gewünschte Ware jedoch nie erhalten.

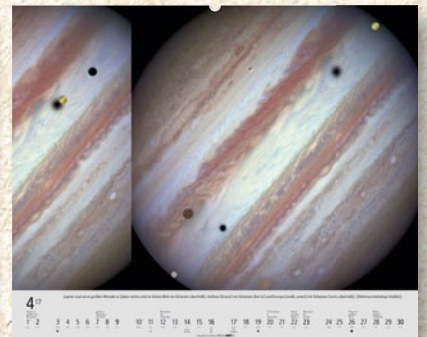
Um den Anteil krimineller Aktivitäten im Darknet zu ermitteln, betrieben Gareth Owen und Nick Savage von der britischen University of Portsmouth selbst sechs Monate lang 40 Tor-Knoten und protokollierten unter anderem die von Nutzern angewählten Seiten. Sie ermittelten laut ihrer im Mai 2016 publizierten Studie etwa 80 000 .onion-Adressen, die allerdings oft sehr kurzlebig waren und sich nur

wenige Tage lang beobachten ließen. Das Forscherduo ordnete die Seiten Kategorien zu (siehe Grafik S. 28). Demnach umfassen legale oder zumindest nicht eindeutig illegale Inhalte knapp 45 Prozent. Darunter waren mit jeweils um die fünf Prozent Maildienste, Whistleblower-Seiten, Wikis, Foren und Anonymisierungsdienste sowie mit etwas geringerer Häufigkeit Blogs, Suchmaschinen und Chats.

Verfälschten Hackerangriffe die Darknet-Daten einer britischen Studie?

Die Abrufe der Seiten als Kriterium der Nutzung ergaben ein irritierendes Bild: Mehr als 80 Prozent betrafen Inhalte aus der Kategorie Missbrauch, während alle anderen Kategorien lediglich ein bis fünf Prozent der Abrufe erreichten. Vergleichbare Zahlen fand jedoch keine andere größere Studie. Eine mögliche Erklärung lautet: Missbrauchsseiten werden auch von Ermittlern beobachtet, Netzaktivisten starten immer wieder Massenabfragen, um kinderpornografische Seiten lahmzulegen.

Explizit für illegale Marktplätze interessierten sich Kyle Soska und Nicolas Christin von der US-amerikanischen Carnegie Mellon University. In einer Langzeiterhebung ha-



**MOTIVE
VORAB ONLINE
ANSCHAUEN!**

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2017

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: dem sichtbaren Licht, dem Infrarotlicht, dem Mikrowellen- und Radiowellenbereich; darüber hinaus zum Teil vom Weltraumteleskop Hubble und der Raumsonde Rosetta.. Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2017 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern abgebildeten Objekte.

14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm;
€ 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand



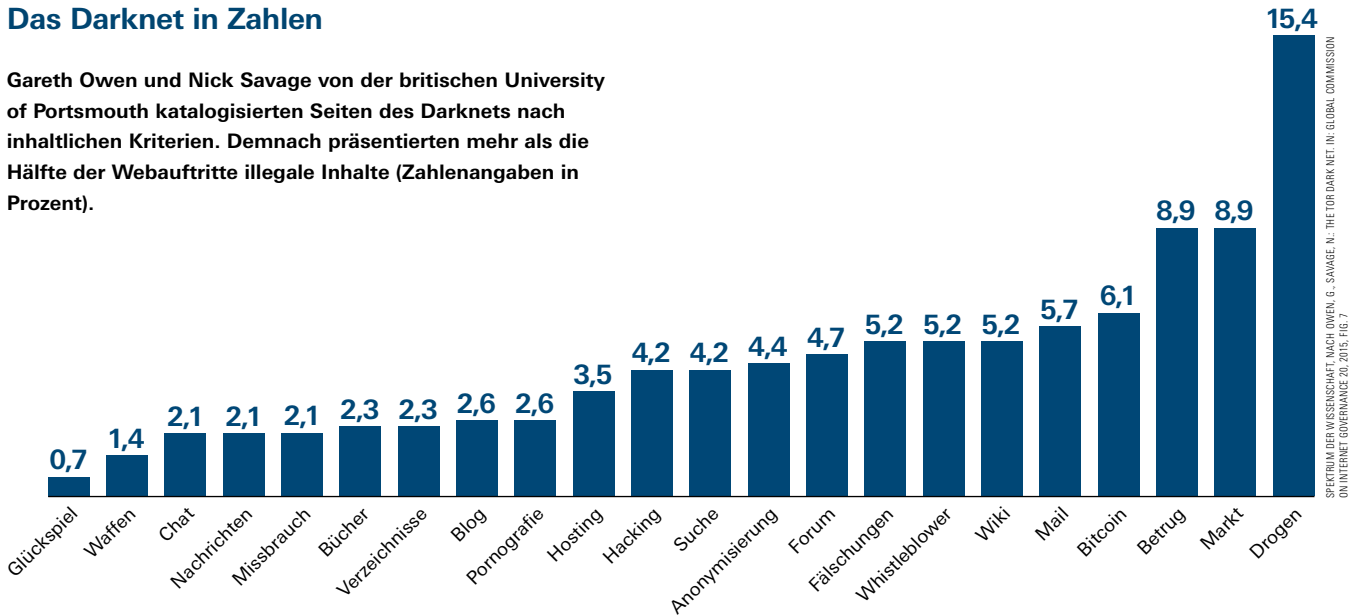
So einfach erreichen Sie uns:
Telefon: 06221 9126-743
sterne-und-weltraum.de/kalender
E-Mail: service@spektrum.de



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!

Das Darknet in Zahlen

Gareth Owen und Nick Savage von der britischen University of Portsmouth katalogisierten Seiten des Darknets nach inhaltlichen Kriterien. Demnach präsentierten mehr als die Hälfte der Webauftritte illegale Inhalte (Zahlenangaben in Prozent).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH OWEN, G. & SAVAGE, N.: THE TOR DARK NET. IN: GLOBAL COMMISSION ON INTERNET GOVERNANCE 20, 2015, FIG. 7

ben sie zwischen Januar 2013 und Juni 2015 insgesamt 35 analysiert und diese durchschnittlich alle drei Tage mit allen Unterseiten gescannt. Um die Umsätze abzuschätzen, erfassten sie, was ein Produkt kostete und – als Hinweis auf die Verkaufshäufigkeit – wie oft es von Nutzern bewertet wurde. Demnach setzen größere Portale rund 300 000 bis 600 000 Dollar pro Tag um, kleinere nur wenige tausend. Etwa 9000 verschiedene Händler waren im Studienzeitraum tätig, im Schnitt boten sie ihre Waren auf drei Marktplätzen gleichzeitig an. Fast zwei Drittel von ihnen machten jedoch

Etwa 43 Prozent der Darknet-Seiten haben keine illegalen, sondern zum Beispiel politische Inhalte

kaum mehr als 1000 US-Dollar Umsatz, betrieben das Geschäft wohl als Hobby. Andere hingegen verfolgten offenkundig professionelle Interessen: Ein Prozent der Anbieter erzielte die Hälfte des gesamten Handelsvolumens.

Über den virtuellen Ladentisch wanderten dabei vor allem gängige Drogen, die im letzten erfassten Monat etwa zwei Drittel der Umsätze ausmachten. Cannabishaltige Substanzen und MDMA-Produkte wie Ecstasy oder Kokain standen dabei an der Spitze. Nennenswert war zudem die Kategorie der Medikamente. Sonstige Güter kamen auf insgesamt weniger als fünf Prozent, dazu zählten Equipment zum Konsum von Drogen, Elektrogeräte, Zigaretten und auch Waffen.

Für den Anteil illegaler Aktivitäten unter .onion interessierten sich auch Daniel Moore und Thomas Rid vom britischen King's College London. Sie ermittelten 5615 .onion-Adressen und schickten so genannte Crawler-Programme

los, allen dort verzeichneten Links zu folgen. So erhielten sie zwischen Januar und März 2015 etwa 300 000 Adressen. Ein Bruchteil davon war tatsächlich online, und von denen wiederum enthielten nur 2723 überhaupt Inhalte. Die Crawler lasen Texte aus – um sich nicht strafbar zu machen, ließen die Forscher keine Mediendateien herunterladen. Eine automatische Analyse ordnete die Daten zwölf Kategorien zu. Demnach enthielten etwa 57 Prozent der untersuchten Seiten illegale Inhalte: Etwa jede sechste mit Drogen zu tun, jede achte mit Finanzgeschäften wie Geldwäsche, Handel mit Kreditkartendaten oder Falschgeld. Extremismus, womit die Autoren terroristische Hetze oder Aufrufe zu Gewalt meinten, und illegale Pornografie nahmen jeweils fünf Prozent der Seiten ein. Waffenhandel fand lediglich auf 1,5 Prozent von ihnen statt. Immerhin 43 Prozent der .onion-Adressen subsumierten Moore und Rid unter »Sonstiges«: ideologische oder politische Inhalte, Whistleblower-Postfächer und legale Dienstleistungen. Das sind weit mehr, als Medienberichte vermuten lassen, die das Darknet als einen Ort des Schreckens zeichnen. ◀

Der Soziologe **Stefan Mey** ist Journalist in Berlin. Zu seinen Themen gehören die ökonomischen und politischen Auswirkungen von Technologie.

QUELLEN

Moore, D., Rid, T.: Cryptopolitik and the Darknet. In: Cryptopolitik and the Darknet, Survival 58, S. 7–38, 2016

Owen, G., Savage, N.: Empirical Analysis of Tor Hidden Services. In: IET Information Security 10, S. 113–118, 2016

Soska, K., Christin, N.: Measuring the Longitudinal Evolution of the Online Anonymous Marketplace Ecosystem. In: Proceedings of the 24th USENIX Security Symposium, 12.–14. August 2015, Washington, D. C. Im Internet unter: <https://www.usenix.org/system/files/conference/usenixsecurity15/sec15-paper-soska-updated.pdf>

FORENSIK FÄLSCHLICHE GENETISCHE FINGERABDRÜCKE

Mit den immer empfindlicheren Verfahren, um DNA-Spuren zu entdecken, steigt die Gefahr falscher Verdächtigungen. Denn sie finden auch indirekt übertragenes Zellmaterial.

Die Polymerase-Kettenreaktion zählt zu den genialsten Erfindungen des 20. Jahrhunderts. Der amerikanische Biochemiker Kary B. Mullis, der dafür 1993 den Nobelpreis für Chemie erhielt, hatte den Geistesblitz auf einer langen Autofahrt im Frühjahr 1983 (**Spektrum** Juni 1990, S. 60). Mit der Methode lassen sich DNA-Sequenzen rasch in den für genetische Analysen erforderlichen Mengen vervielfältigen.

Die Möglichkeit, Informationen aus winzigen Spuren DNA zu gewinnen, revolutionierte in den 1990er Jahren auch die Forensik. Schon die unsichtbaren Spuren von Hautabrieb, die jemand etwa an einer Türklinke hinterlässt, können genügen, um von ihm einen »genetischen Fingerabdruck« zu erstellen. Vor 20 Jahren reichten dafür 300 Pikogramm (10^{-12} oder ein billionstel Gramm) aus, die DNA von lediglich ein paar Dutzend Zellen. Die modernen Nachweismethoden benötigen nochmals deutlich weniger DNA. Heutige kommerzielle Test-Kits erfordern nur noch 100 Pikogramm Erbmaterial. Und die modernsten Sequenzierautomaten der Genomforschung können bereits eine einzelne DNA-Doppelhelix auslesen. Da diese Verfahren immer kostengünstiger werden, dürften auch sie bald in der Forensik Anwendung finden.

Meistens lässt sich mit solchen Analysen eine Person mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit anhand bestimmter individueller genetischer Muster identifizieren. Genau genommen ist allerdings lediglich der Ausschluss von Individuen über DNA-Vergleiche wirklich zweifelsfrei möglich. Ein positiver Nachweis beruht dagegen immer auf komplexen Wahrscheinlichkeitsüberlegungen. Denn obwohl jeder Mensch genetisch unverwechselbar ist, können manche Muster im Genom, die für solche Zwecke herangezogen werden, in seltenen Fällen zwischen verschiedenen Personen übereinstimmen und dann zu Fehlschlüssen führen – sofern man die betreffenden Erbgutproben nicht nochmals eingehender überprüft. Mittlerweile liegen statistische Studien dazu vor, unter welchen Bedingungen falsche Zuordnungen praktisch auszuschließen sind. Daran orientieren sich Gerichte, und vor diesem Hintergrund haben genetische Indizien in der Strafverfolgung heutzutage hohes Gewicht.

Allerdings gibt es weitere Quellen für Irrtümer, die Analytiker zunächst für nicht relevant hielten, die sich aber mit den immer stärker verfeinerten Tests zunehmend bemerkbar machen. Denn am Tatort kann sich DNA eines Menschen finden, der selbst dort niemals gewesen ist.

Internationale Fachmesse
Ideen · Erfindungen · Neuheiten

iENA

In Kombination mit:
**START
MESSE**
Gründung
Finanzierung
Nachfolge
Franchising
29.+30.10.
MESSE NÜRNBERG

2016

27.-30. Oktober



- **Neue Ideen für den Markt.**
Die iENA 2016 Nürnberg ist der internationale Markt für Ideen, Erfindungen und Neuheiten.
- **Wichtig für alle,** die Erfindungen und Neuheiten verwerten und Top-Kontakte zu Erfindern suchen.
- **Innovationsseminar**
(Teilnahme im iENA-Eintritt enthalten)
Freitag, 28. Oktober 2016
10.30 - 12.30 Uhr - „Von der Idee zur Innovation“
13.30 - 15.00 Uhr - „Grundlagen des Innovationsmanagements“
- **iENA-START-Symposium**
(Teilnahme im iENA-Eintritt enthalten)
Samstag, 29. Oktober 2016
10.00 - 12.30 Uhr - „Mit der Idee zum Erfolg - Erfinden und zum Unternehmer werden“
- **Fachberatung und Information**
Messe Nürnberg · Halle 12

In Kooperation mit:

PSI

IFIA
INTERNATIONAL FEDERATION
OF INVENTORS' ASSOCIATIONS

Consumenta

Veranstalter/Organisation
AFAG Messen und Ausstellungen GmbH
☎ 09 11-9 88 33-570

iena@afag.de · www.iena.de

Dass die Fehleranfälligkeit mit der Empfindlichkeit der Methodik steigt, erfuhr die Arbeitsgruppe des Paläoanthropologen Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig bereits vor zehn Jahren, als sie daranging, das Erbgut des Neandertalers zu bestimmen. Diese DNA liegt nur bruchstückhaft vor. Zudem sind die aus Knochen oder Zähnen gewonnenen Proben mit Überresten anderer Organismen verunreinigt. Als das Team 2006 erste Ergebnisse zu einem Teil der Erbsequenzen vorstellte, kündigte es den Abschluss des Projekts für 2008 an. Doch bald stellte sich heraus, dass auch DNA von modernen Menschen, etwa des Laborpersonals, mit sequenziert worden war. Mit nochmals deutlich strengeren Sicherungsmaßnahmen fingen die Forscher das Projekt von vorn an. Schließlich konnten sie 2010 das relativ komplette Neanderdalergenom präsentieren (siehe **Spektrum** Juli 2010, S. 12).

Den Forensikern hätte diese Erfahrung eine Warnung sein können. Aber sie hielten sich weiterhin an Studien aus dem Jahr 1997, denen zufolge ein falsches Ergebnis durch indirekte Übertragung von DNA unwahrscheinlich ist. Für die Anfangszeiten solcher Analysen mag das zugetroffen haben. Nur hat sich die Nachweisschwelle für mögliche genetische Verschmutzungen seither um zwei Drittel verringert, die Fehlerwahrscheinlichkeit folglich entsprechend erhöht.

Übertragung auf den Tatort durch dasselbe Rettungsteam

Eine aufschlussreiche Studie auf dem Gebiet führte kürzlich Cynthia M. Cale von der University of Indianapolis (Indiana) durch. »Unschuldige« und »schuldige« Teilnehmer drückten einander zwei Minuten die Hand. Anschließend ergriffen die »Täter« ein Steakmesser. Danach fand sich auf 17 von 20 Messern DNA des jeweils »unschuldigen« Probanden. In einigen Fällen erschien dieser sogar als der mutmaßliche Täter, weil die meisten oder alle Erbgutspuren am Messergriff von ihm stammten.

Die Rolle von kontaminierten Kleidungsstücken, Plastiktüten oder etwa Schutzhandschuhen bei der Weitergabe von Zellspuren untersucht die Arbeitsgruppe von Micaela Poetsch vom Universitätsklinikum Essen. Selbst eine Reinigung mit Wasser beseitigt die Kontamination demnach oft nicht ausreichend. Wie leicht sich Hautabschilferungen übertragen, zeigt auch eine neue Untersuchung australischer Forscher. Sie wiesen auf einzelnen Fasern von Kleidungsstücken Erbgutsequenzen anderer Personen nach. Eine weitere Studie belegt, dass es genügt, mit einem Tuch über die Haut eines Menschen zu streifen, um damit anschließend einen Gegenstand zu kontaminieren.

Besonders lehrreich – und erschreckend – sind die Irrwege bei den Ermittlungen zum Mord an der Polizistin Michèle Kiesewetter in Heilbronn. Sie wurde im April 2007 durch einen Kopfschuss getötet, ihr Kollege lebensgefährlich verwundet. Zwei Jahre lang suchte die Polizei nach

einer mysteriösen Frau, deren DNA-Signatur im Zusammenhang mit der Tat aufgetaucht war. Den gleichen genetischen Fingerabdruck erkannte man auch bei einer Anzahl weiterer Verbrechen – bis Ende März 2009 herauskam, dass die in all diesen Fällen zur Spurensicherung verwendeten Wattestäbchen von einer Mitarbeiterin der Lieferfirma beim Abpacken verunreinigt worden waren.

Bisher sind nur vereinzelte Beispiele von konkreten falschen Beschuldigungen wegen einer DNA-Kontamination durch Dritte bekannt. In den USA machte vor ein paar Jahren der Fall eines Obdachlosen aus San Francisco Schlagzeilen, der wegen Raubmords an einem reichen Geschäftsmann angeklagt war: Unter den Fingernägeln des Toten fanden sich Zellen des betreffenden Mannes. Erst in der Gerichtsverhandlung kam heraus, dass der Verdächtige schon einige Stunden vor der Tat schwer alkoholisiert und fast komatös im Krankenhaus gelandet war, wo er die ganze Nacht unter konstanter medizinischer Überwachung bleiben musste. Wie anschließende Nachforschungen ergaben, wurde dasselbe Rettungsteam, das den Betrunkenen aufgelesen und in die Klinik gebracht hatte, danach zu dem schwer verwundeten Millionär geschickt, wo es um dessen Leben kämpfte. Offenbar hatten diese Leute noch Zellen des Obdachlosen an sich, vielleicht an ihrer Kleidung, und übertrugen sie auf das Opfer.

So wertvoll genetische Indizien vor Gericht sind: Juristen und ihre Berater müssen dabei stets die wissenschaftlichen Fortschritte einkalkulieren und daher immer wieder die in früheren Phasen bewährten statistischen Überlegungen hinterfragen. Wie leicht sich DNA mittels Gegenständen und Kleidungsstücken überträgt und wie lange sie letztlich nachweisbar bleibt, ist noch nicht klar. Genetiker wissen zumindest schon, dass die Sterilisation von Handschuhen und verwendeten Geräten allein sie nicht beseitigt. Kurzum: DNA-Spuren lassen sich kriminalistisch oft auf mehrere Weise deuten. Es muss sich eben nicht unbedingt um genetische Fingerabdrücke vom Straftäter handeln. Deswegen dürfen Ermittler sich nicht in der Hauptsache darauf stützen, sondern müssen sie als ein Indiz neben anderen werten. ◀

Michael Groß ist promovierter Chemiker und lebt als Wissenschaftsjournalist und Buchautor in Oxford.

QUELLEN

Blackie, R. et al.: DNA Profiles from Clothing Fibers Using Direct PCR. In: *Forensic Science, Medicine, and Pathology* 10.1007/s12024-016-9784-y, 2016

Cale, C.M. et al.: Could Secondary DNA Transfer falsely Place Someone at the Scene of a Crime? In: *Journal of Forensic Sciences* 61, S. 196–203, 2016

Helmus, J. et al.: DNA Transfer – a never Ending Story. A Study on Scenarios Involving a Second Person as Carrier. In: *International Journal of Legal Medicine* 130, S. 121–125, 2016

Kamphausen, T. et al.: Everything Clean? Transfer of DNA Traces between Textiles in the Wash tub. In: *International Journal of Legal Medicine* 129, S. 709–714, 2015



SPRINGERS EINWÜRFE WO DIE ARMEN WOHNEN

Entwicklungspolitik ohne Daten gleicht einer Gießkanne in der Hand eines Blinden. Bilderkennungssoftware entlockt Satellitenaufnahmen präzise Informationen über die Orte größten Mangels.

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

» spektrum.de/artikel/1420970

Global gesehen lebt jeder zehnte Mensch unter der absoluten Armutsgrenze, welche die Weltbank auf 1,90 Dollar pro Kopf und Tag festgesetzt hat. Um diesen für unsere Lebensverhältnisse unvorstellbar niedrigen Wert wirksam anzuheben, braucht Entwicklungspolitik genaue Auskunft über jene Regionen, die am dringendsten Hilfe benötigen.

Doch meist ist das Wissen über lokale Armut in einem Teufelskreis gefangen: Je hilfsbedürftiger ein Land, desto armseliger auch sein Informationsstand; der schwache Staat leidet unter Korruption, wird von internen Konflikten zerrissen oder kann sich eine verlässliche Volkszählung schlicht nicht leisten.

Darum behilft sich die Entwicklungsforschung schon seit einigen Jahrzehnten mit nächtlichen Satellitenbildern. Sie zeigen im Großen und Ganzen gut an, wie der Reichtum auf dem Globus verteilt ist: bei den Wohlhabenden ein Lichtermeer, bei den Armen Finsternis.

Je hilfsbedürftiger ein Land, desto armseliger ist auch sein Informationsstand

Allerdings versagt dieses Instrument bei der Frage, wo der Mangel am größten ist. Es gibt dunkle Gebiete, in denen zumindest kein Elend herrscht; sie unterscheiden sich im Nachtbild nicht von den wirklich kritischen Regionen, die ohne Hilfe zu Grunde gehen.

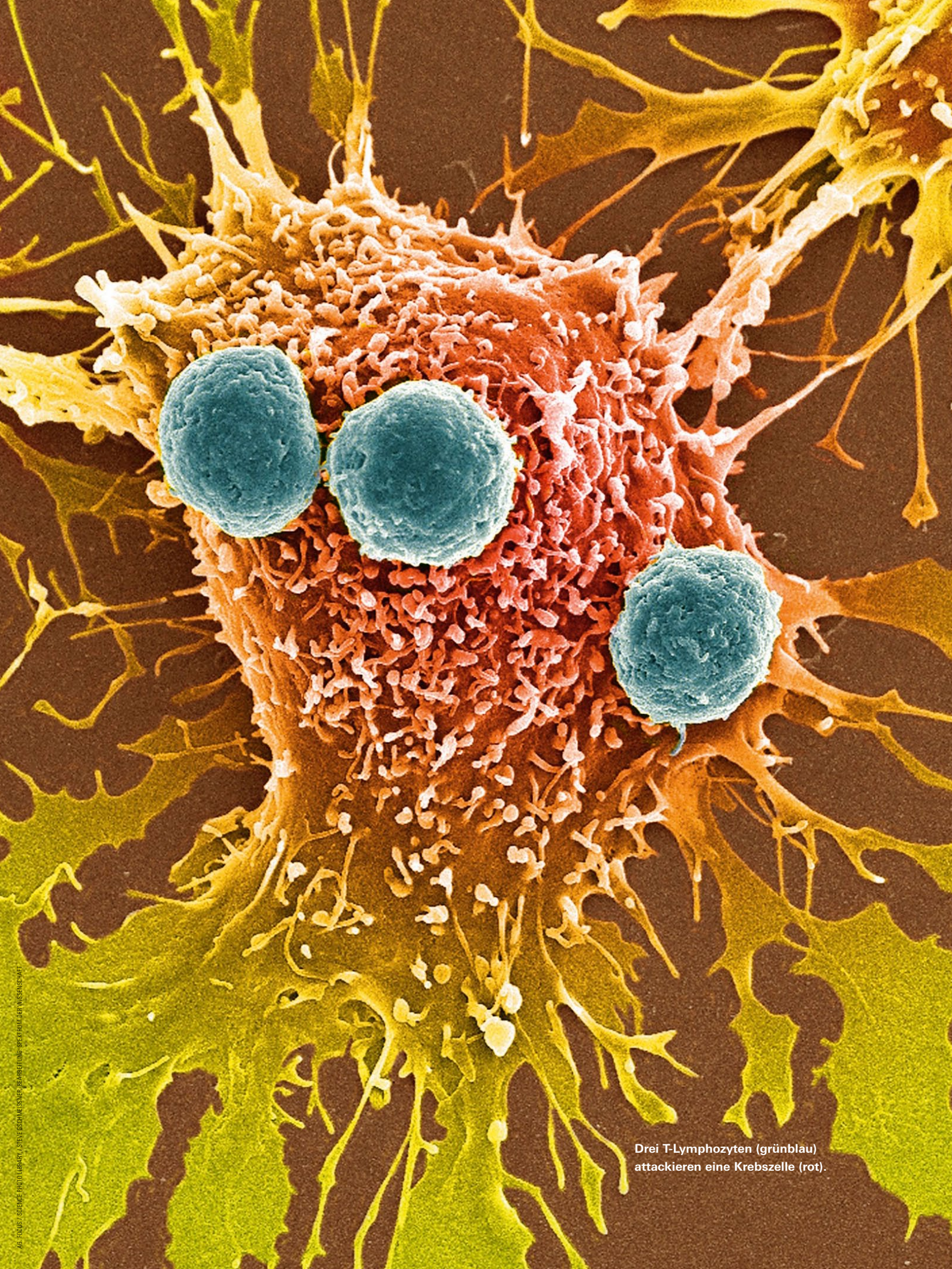
Dieses Dilemma löst nun ein Ansatz, der bei Tag gewonnene Satellitenaufnahmen mit lernfähigen Bilderkennungsalgorithmen kombiniert. Die Tagbilder zeigen, obwohl sie aus dem erdnahen Weltraum aufgenommen werden, eine Fülle von minuziösen Einzelheiten wie Wellblechdächer und asphaltierte Straßen, aber auch Zeltstädte und Flüchtlingslager, als hätten Drohnen in geringer Höhe die Landschaft überflogen.

Eine interdisziplinäre Gruppe um den Informatiker Neal Jean und den Entwicklungsökonom Marshall Burke von der Stanford University hat jetzt ein Computerprogramm darauf trainiert, aus solchen Details einen Armut Indikator abzulesen. Es handelt sich im Prinzip um ein künstliches neuronales Netz, das nach dem Vorbild der Sehrinde von Tieren und Menschen darauf spezialisiert ist, Einzelbilder zu integrieren und zu deuten.

Durch Vergleich von Nacht- und Tagaufnahmen lernt der komplexe Algorithmus allmählich, welche Bilddetails auf ökonomische Aktivität und Verkehrswege hinweisen – beziehungsweise auf deren Abwesenheit. An Ländern mit halbwegs bekannten Wirtschaftsdaten lässt sich überprüfen, welche Lernfortschritte das Programm macht. Dabei erweist sich, dass das durch maschinelles Lernen anhand eines Landes trainierte Modell Aussagen über die Armut eines anderen Gebiets zu treffen vermag, das zu eigenen kostspieligen Erhebungen nicht im Stande ist (*Science* 353, S. 790–794, 2016).

Satellitenbilder sind, beispielsweise über Google Earth, heutzutage allgemein zugänglich. Es ist gewiss erfreulich, wenn sie sich im Dienste der Entwicklungshilfe für preiswerte Armutsdagnostik nutzen lassen. Bemerkenswert ist allerdings auch, wie leicht es wird, mit modernster Bilderkennungssoftware praktisch alles über die Wirtschaftskraft und Verteidigungsbereitschaft eines potenziellen Kriegsgegners zu erfahren – ganz ohne spezielle Spionagetätigkeit. Darum ist es wohl kein Zufall, dass Neal Jean bei der Entwicklung des von seinem Team präsentierten Bilderkennungsprogramms mit Geldern des US-Militärs unterstützt wurde.

Wie die Forscher betonen, haben sie die Satelliten-daten absichtlich unschärfer gemacht und anonymisiert, um die informationelle Selbstbestimmung der betrachteten Nationen zu wahren. Im Umkehrschluss heißt das: Die Daten geben noch viel mehr her.



Drei T-Lymphozyten (grünblau)
attackieren eine Krebszelle (rot).

MEDIZIN

KREBS BEKÄMPFEN MIT DEM EIGENEN IMMUNSYSTEM

Immuntherapien gegen Krebs stehen noch ziemlich am Anfang, liefern aber bereits einzelne verblüffende Ergebnisse. Den behandelnden Ärzten fordern sie vor allem eines ab: Fingerspitzengefühl.



Karen Weintraub ist Wissenschaftsjournalistin und schreibt regelmäßig unter anderem für »New York Times«, »USA Today« und »Scientific American«.

► spektrum.de/artikel/1420972

► Hätte Michelle Boyer ihre Krebsdiagnose drei Jahre früher erhalten, wäre sie heute wahrscheinlich tot. Sie litt an fortgeschrittenem und aggressivem Hautkrebs, genauer am malignen Melanom, einem bösartigen Tumor der Pigmentzellen. Der Krebs hatte bereits von einem Leberfleck auf ihrem Rücken in ihre Lunge gestreut. Boyer war sich ihrer schlechten Prognose nur allzu bewusst. Und so willigte sie ab Mai 2013 in eine Reihe revolutionärer Therapien ein, von denen manche erst seit 2011 verfügbar gewesen waren. Die Behandlungen brachten ihr Immunsystem dazu, die Tumoren zu erkennen und anzugreifen. Das hatte zahlreiche Nebenwirkungen, doch es wendete den fast sicheren Tod ab. Und Boyer kann sogar hoffen, dass es den Ärzten irgendwann gelingen wird, ihre Krankheit ganz zurückzudrängen.

Die 59-jährige Karen Koehler hat den Immuntherapie-Jackpot vielleicht schon gewonnen – im ersten Anlauf. Anfang 2015 erhielt sie eine einzelne Infusion ihrer eigenen Immunzellen, die zuvor entnommen und gentechnisch verändert worden waren, um ihre Leukämie zu bekämpfen. Nach dieser Behandlung, die ein paar Stunden dauerte, landete sie zunächst für mehrere Tage auf der Intensivstation, da ihr Immunsystem massiv überreagierte. Anschließend musste sie mehrere Wochen im Krankenhaus verbringen, bis sich ihr Zustand normalisiert hatte. Doch binnen eines Monats nach der Behandlung waren sämtliche Spuren der Krebserkrankung aus ihrem Körper verschwunden.

Boyer und Koehler sind zwei von tausenden Patienten, die sich in den zurückliegenden fünf Jahren verschiedenen Arten der Krebsimmuntherapie unterzogen haben. Ihre Schicksale verdeutlichen sowohl die Verheißungen als auch die Herausforderungen dieses neuen Ansatzes zur Tumorbekämpfung: Statt den Körper von außen mit giftigen Chemikalien oder Strahlenbehandlungen zu malträtieren,

um Krebszellen abzutöten, aktiviert man Bestandteile seiner Immunabwehr, damit diese den Job von innen heraus erledigen. Die bisherigen Ergebnisse sind ermutigend und machen Immuntherapien zu einer weiteren tragenden Säule der Krebsmedizin – neben operativen Eingriffen, Bestrahlungen und Chemotherapien.

In klinischen Versuchen mit Erwachsenen und Kindern, die an einer extrem aggressiven Form von Leukämie litten und eine innovative Immuntherapie erhielten, trat bei 90 Prozent von ihnen eine komplette Remission (Rückbildung) der Krankheitssymptome auf: Der Krebs war in ihrem Organismus nicht mehr nachweisbar. Bei einigen wird die Krankheit wohl zurückkehren, aber viele scheinen auf dauerhafte Heilung hoffen zu dürfen. Mehr als jeder zweite Patient mit fortgeschrittenem Melanom, der sich einer Immun-

AUF EINEN BLICK ENTFESSELTE SELBSTHEILUNG

- 1** Seit einigen Jahren erzielen Mediziner erste Erfolge mit Krebsimmuntherapien. Diese fördern die Immunabwehr darin, entartete Zellen zu bekämpfen.
- 2** Tausende Patienten mit aggressiven und fortgeschrittenen Krebserkrankungen sind bereits mit Immuntherapien behandelt worden. Viele von ihnen scheinen sogar geheilt zu sein.
- 3** Die Abwehrkräfte des Körpers zu entfesseln, kann allerdings massive Nebenwirkungen und Überreaktionen nach sich ziehen. Forscher arbeiten daher daran, die Behandlung sicherer und effizienter zu machen.

therapie unterzieht, kann heute anschließend mit einer Lebenserwartung rechnen, die sich in Jahren statt Monaten bemisst. Die Immuntherapie, betont Gary Gilliland, Präsident und Direktor des Fred Hutchinson Cancer Research Center in Seattle, stelle einen »wahrhaftigen Paradigmenwechsel in der Krebsbekämpfung« dar.

Zugegeben: Der Zeitpunkt für solche Aussagen ist noch recht früh. Selbst wenn die Überlebenszeit nach einer Krebsdiagnose auf mehrere Jahre anwächst, bedeutet das immer noch, dass die Patienten der Krankheit letztlich erliegen werden. Deshalb arbeiten die Forscher kontinuierlich weiter daran, Blockaden im Immunsystem zu lösen und die Immunantwort zu verstärken – unter anderem mit Impfstoffen, Viren, gentechnisch veränderten Zellen und Arzneistoffen (siehe »Drei Immunstrategien«, S. 38/39). Sie gehen mehr und mehr auch dazu über, verschiedene therapeutische Ansätze zu kombinieren, um mehr Patienten zu helfen, und das mit möglichst wenigen Nebenwirkungen. Aber mittlerweile ist unzweifelhaft erwiesen, dass sich dem Krebs mit Hilfe der Körperabwehr Paroli bieten lässt – zumindest eine Zeit lang.

Der Traum, Tumorerkrankungen mit dem Immunsystem selbst zu bekämpfen, ist mindestens 125 Jahre alt. Damals injizierte der New Yorker Arzt William Coley manchen seiner Krebspatienten Bakterien, um so ihre natürlichen Selbstheilungskräfte zu stimulieren (siehe **Spektrum** Juli 2014, S. 30). Einige Mediziner übernahmen seinen Ansatz zunächst, aber nach Coleys Tod 1936 geriet er allmählich aus dem Blick, da Fortschritte in der Chemotherapie und später Hormon- sowie Antikörperbehandlungen konsistentere Ergebnisse an einer größeren Zahl von Patienten lieferten.

Das Konzept hat allerdings nie seinen Reiz verloren. Heute sitzen seine Unterstützer unter anderem im Cancer Research Institute in New York, 1953 als Non-Profit-Organisation von Coleys Tochter Helen gegründet. In den zurückliegenden Jahrzehnten hat die Molekularbiologie das Verständnis des Immunsystems wesentlich vertieft, und dies wiederum führte dazu, dass Mediziner ihr Arsenal an immunologischen Waffen immer weiter aufstocken konnten.

Zu den meistversprechenden Zielen der Krebsimmuntherapie gehören Krebsarten des Blut bildenden und des lymphatischen Systems: Leukämien und Lymphome. Diese Krankheiten entstehen, wenn Stammzellen, die normalerweise rote und weiße Blutkörperchen hervorbringen, mutieren und sich unkontrolliert zu teilen beginnen. Ihre entarteten Tochterzellen verdrängen dann nach und nach die gesunden Zellen und berauben den Körper lebenswichtiger Funktionen. Viele dieser so genannten hämatologischen

Tumoren manifestieren sich, wenn Störungen bei B-Lymphozyten auftreten, die zu den weißen Blutkörperchen gehören. Normalerweise stellen B-Lymphozyten Antikörper gegen Bakterien und Viren her; gemeinsam mit T-Lymphozyten helfen sie zudem, verschiedene andere Immunreaktionen zu koordinieren. Im entarteten Zustand jedoch zerstören sie den Körper von innen heraus.

Medizinische Lenkwaffe markiert Zellen als Ziele für die Immunabwehr

Ende des 20. Jahrhunderts entwickelten Wissenschaftler das biologische Äquivalent eines Lenkflugkörpers – einen Antikörper namens Rituximab, der an das Protein CD20 bindet. Dieses findet sich vor allem auf der Oberfläche reifer B-Lymphozyten. Rituximab provoziert T-Lymphozyten zu einem ungewöhnlichen Verhalten: Er bringt sie dazu, reife CD20-präsentierende B-Zellen anzugreifen und zu zerstören. Das macht ihn zu einem geeigneten Arzneistoff, um etwa bösartige Erkrankungen des lymphatischen Systems zu behandeln – vorausgesetzt, die Krebszellen besitzen das Oberflächenmolekül CD20.

CD20 ist kein krebsspezifisches Molekül. Deshalb tötet eine Rituximab-Behandlung sowohl gesunde als auch entartete B-Zellen ab. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass die meisten Menschen ohne B-Zellen leben können – für T-Lymphozyten gilt das nicht, wie die Millionen Aids-Toten belegen, die dem T-Zell-infizierenden HI-Virus erlagen und erliegen. Sobald die Wirkung der Rituximab-Therapie nachlässt, beginnt der Körper in der Regel damit, seinen B-Zell-Vorrat wieder aus Stammzellen im Knochenmark aufzufüllen. Klinische Studien in den 1990er Jahren haben gezeigt, dass die Kombination aus Chemotherapie und Rituximab-Behandlung besonders gut gegen B-Zell-basierte Krebsarten wirkt.

Karen Koehlers Leukämie hatte ihre Ursache in mutierten B-Zellen, doch Rituximab verursachte bei ihr schwere Nebenwirkungen und zeigte kaum therapeutischen Nutzen, so dass Koehler die Behandlung abbrach. Überdies deuteten Tests darauf hin, dass ihr Krebs nicht auf eine Standard-Chemotherapie ansprechen würde. Da sich ihr Zustand rapide verschlechterte, schlugen die Ärzte ihr eine experimentelle Immuntherapie vor, die speziell auf ihre Krankheit zugeschnitten sein sollte. Koehler erklärte sich einverstanden.

Die innovative Behandlung zielte zwar ebenfalls darauf ab, Koehlers B-Zellen zu zerstören, aber mit zwei wesentlichen Unterschieden zur Rituximab-Therapie. Sie richtete sich nicht gegen CD20, sondern gegen CD19, ein anderes Protein auf B-Zellen. Und statt einen fremden Antikörper zuzugeben, der dieses Protein als Ziel für die T-Lymphozyten markiert, gingen die Mediziner direkter vor. Sie entnahmen Koehler einige T-Zellen, veränderten sie gentechnisch dahingehend, dass sie CD19 von selbst angreifen, und gaben die Zellen der Patientin zurück.

Solche modifizierten »Turbo-T-Zellen« bezeichnen Forscher als chimäre Antigen-Rezeptor-T-Zellen oder kurz CAR-T-Zellen. Der Begriff chimär bezieht sich darauf, dass diese Zellen bestimmte Eigenschaften von T- und B-Zellen vereinen und damit gewissermaßen Mischwesen sind. Noch ist die CAR-T-Therapie im Versuchsstadium, doch sie gehört



FOTOLIA / SEBASTIAN KAULITZKI

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



2013 wurde bei Michelle Boyer fortgeschrittener, metastasierter Hautkrebs diagnostiziert. Nach sechs Immuntherapiezyklen ist sie zwar nicht geheilt, lebt aber jetzt schon länger, als es ihre Ärzte ursprünglich für möglich gehalten hatten.

zu den Hoffnungsträgern in der Krebstherapie. Allerdings musste im Juli 2016 eine einschlägige Untersuchung gestoppt werden: In der amerikanischen ROCKET-Studie kam es unter den behandelten B-Zell-Leukämiepatienten zu drei Todesfällen. Wenig später hieß es seitens des durchführenden Biotech-Unternehmens, die Todesursache seien nicht die modifizierten Immunzellen gewesen, sondern die zusätzliche Gabe eines Chemotherapeutikums.

Die CAR-T-Zellen, die gegen CD19 gerichtet waren, vermehrten sich im Körper von Karen Koehler so rasch, dass ihre einmalige Infusion am 10. Februar 2015 sämtliche B-Zellen ausschaltete. Im Unterschied zu anderen Patienten war Koehlers Organismus anschließend jedoch nicht mehr in der Lage, gesunde B-Zellen herzustellen. Glücklicherweise lässt sich das kompensieren: Um Koehler vor Infektionen zu schützen, erhält sie jeden Monat eine mehrstündige Infusion künstlich hergestellter Antikörper, so genannter Gammaglobuline, die vor allem gegen Viren und Bakterien wirken. Diese Infusionen sind Zeit raubend und unangenehm, aber verglichen mit einer Chemotherapie das kleinere Übel.

Allerdings können die direkten Nebenwirkungen der CAR-T-Zelltherapie schlimmer sein als die einer Chemotherapie. Bei Koehler führte die Behandlung zu einem so genannten Zytokinsturm, einer massiven Überreaktion des Immunsystems. Sie tritt auf, wenn viel mehr T-Zellen gleichzeitig aktiviert werden als üblich und der Körper von biochemischen Signalstoffen, den Zytokinen, regelrecht überflutet

wird. Das kann eine lebensbedrohliche Situation herbeiführen, in der die Immunzellen gesundes Gewebe zu attackieren beginnen und ein Multiorganversagen auslösen.

Bei Koehler äußerte sich der Zytokinsturm schnell und heftig. Binnen einer Stunde nach der CAR-T-Zellinfusion fühlte sie sich miserabel. In der Nacht musste sie auf die Intensivstation verlegt werden, wo sie acht Tage lang blieb – die Hälfte der Zeit im Koma und nicht ansprechbar. Sie erinnert sich nicht an diese Zeit, wohl aber an die Halluzinationen, die sie ein paar Tage später hatte, als sie das Pflegepersonal bat, ihr beim Packen der Verpflegungspakete für einige berühmte Golfspieler zu helfen.

Tagelanges Koma nach der Immuntherapie – doch der Krebs offenbar vernichtet

Als Koehler das Krankenhaus im März 2015 verließ, war sie unglaublich schwach, erholte sich aber rasch. Ein Knochenmarktest ergab keine Hinweise auf eine Krebserkrankung mehr, und drei Wochen später ging sie mit ihrem Mann golfen. Ihr Fall ist insofern exemplarisch, als Zytokinstürme bei CAR-T-Zelltherapien ziemlich häufig vorkommen. Die Mediziner lernen die Behandlung jedoch immer besser zu dosieren, um den größtmöglichen therapeutischen Nutzen zu erzielen, ohne das Leben der Patienten zu gefährden.

Eine CAR-T-Zell-Therapie muss auf jeden Patienten spezifisch zugeschnitten werden. Das ist nicht nur eine enorme Herausforderung, sondern auch extrem teuer. Freilich lassen sich die genauen Kosten derzeit nicht beziffern, da die CAR-T-Zellbehandlung bislang nur in klinischen Studien zum Einsatz kommt. Robert Preti, Gründer des Unternehmens PCT, das CAR-T-Zelltherapien entwickelt, ist davon überzeugt, dass die derzeitigen technischen Schwierigkeiten des Verfahrens in einigen Jahren gelöst sein werden – was die Kosten senken dürfte.

Äußerst verlockend ist die Perspektive, den Erfolg der CAR-T-Behandlung von hämatologischen auf solide Tumoren auszudehnen – also auf klumpige Wucherungen im Körpergewebe, beispielsweise in der Brust, Prostata, Lunge oder Haut. CAR-T-Zellen auf sie zu hetzen, ist jedoch schwierig. Denn während entartete Zellen im Blut relativ leicht zugänglich sind, sieht das bei soliden Tumoren im Gewebeverband ganz anders aus. Und vielleicht noch wichtiger: B-Zellen, die außer Kontrolle geraten sind, kann man relativ bedenkenlos aus dem Körper eines Patienten entfernen – nicht zwangsläufig aber einen Gewebeklumpen.

Solide Tumoren stellen die Immuntherapie vor ganz besondere Schwierigkeiten. Sie sind oft von Binde- und anderem Gewebe umgeben, das den Eintritt von Immunzellen in die Tumormasse behindert. Zudem ist der Innendruck in einem soliden Tumor meist höher als in dessen Umgebung, so dass Signalstoffe, mit denen das Immunsystem abnorme Zellen markiert, leicht aus der Wucherung herausgespült werden – ebenso wie zahlreiche Arzneistoffe.

Dennoch haben diese Tumoren einige Schwachstellen. Im Jahr 2011 ließ die FDA einen Antikörper namens Ipilimumab zur Behandlung des fortgeschrittenen Melanoms zu. Im Gegensatz zu herkömmlichen Therapeutika tötet Ipilimumab die Tumorzellen nicht direkt ab, sondern löst stattdessen biochemische »Bremsen«, mit denen der Krebs das



Karen Koehler litt an schwer behandelbarer Leukämie. Der Krebs bildete sich vollständig zurück, nachdem sie eine Infusion ihrer eigenen Immunzellen erhalten hatte, die gentechnisch verändert worden waren.

Immunsystem blockiert (siehe **Spektrum** August 2014, S. 30). Bei diesen Bremsen handelt es sich um Immun-Checkpoints: Proteine, die Immunreaktionen unterdrücken und normalerweise verhindern, dass die Körperabwehr außer Kontrolle gerät und gesundes Körpergewebe angreift. Einige

Tumoren missbrauchen diesen Mechanismus jedoch, indem sie über die Immun-Checkpoints die Aktivierung der T-Lymphozyten unterbinden. Auf diese Weise bleiben sie unbehelligt, obwohl sie eigentlich auf Grund ihrer tumorspezifischen Antigene ein gut erkennbares Ziel für die Körper-

Bakteriologische Kriegführung

Die Fähigkeit des Immunsystems, maligne Erkrankungen zu bekämpfen, scheint vom Mikrobiom abzuhängen.

Warum sprechen manche Krebspatienten deutlich besser auf die neuen Immuntherapien an als andere? Eine Rolle spielen sicherlich die Genome der Patienten und ihrer Tumoren. Es gibt aber noch einen weiteren, bisher kaum beachteten Aspekt – nämlich die Zusammensetzung des Mikrobioms, jener Gesamtheit zahlloser Mikroben, die auf und in unserem Körper siedeln. Wie sehr sich das Mikrobiom auf das Krankheitsgeschehen auswirken kann, das belegen Arbeiten von uns und anderen Wissenschaftlern.

Mikrobiome verschiedener Menschen können sich in ihrer Zusammensetzung erheblich unterscheiden. Das gilt insbesondere für die Darmflora. Das Spektrum der jeweils vertretenen Bakterienstämme beeinflusst, wie das Immunsystem auf eine Tumorerkrankung reagiert – und zwar über Mechanismen, die noch nicht vollständig verstanden sind. Einige Bakterienarten veranlassen die Körperabwehr zu entzündlichen Überreaktionen, die gesunde Körperzellen entarten lassen oder Immunzellen dazu bringen, gesundes Gewebe zu attackieren, etwa bei rheumatoider Arthritis.

Manchmal unterstützen körperbesiedelnde Mikroben offenbar auch den Erfolg einer Krebstherapie. An der University of Chicago experimentierten wir mit Mäusen zweier Gruppen, die genetisch zwar identisch sind, aber in verschiedenen Umgebungen aufgezogen wurden und sich daher hinsichtlich ihres Mikrobioms unterscheiden. Als wir diesen Nagern Hautkrebszellen injizierten,

wuchsen die daraus entstehenden Tumoren in Tieren der einen Gruppe langsamer als in solchen der anderen. Im ersten Fall zeigten die Mäuse eine stärkere Immunreaktion gegen den Tumor. Übertrugen wir ihr Mikrobiom auf Tiere der anderen Gruppe, verlangsamte sich auch bei diesen das Tumorwachstum. Eine solche Übertragung von körperbesiedelnden Mikroben gelingt etwa durch Austausch von Kot zwischen den Tiergruppen.

Wie eine DNA-Analyse von Kotproben aus den beiden Mäusegruppen ergab, schienen zwei Bakterienarten der Gattung *Bifidobacterium* für die unterschiedliche Antitumorreaktion verantwortlich zu sein. Bemerkenswerterweise reichte es aus, eine der Arten (*Bifidobacterium longum* oder *Bifidobacterium breve*) auf die Tiere zu übertragen, um deren Immunreaktion zu verstärken und das Wachstum der Tumoren zu bremsen. Die Anwesenheit dieser Bakterienspezies beeinflusste sogar, wie gut die Tiere auf einen Immun-Checkpoint-Inhibitor (siehe Haupttext) ansprachen.

Bei den Mäusen, die mit dem Checkpoint-Inhibitor behandelt wurden und deren Mikrobiom sowohl die Mikroben *B. longum* als auch *B. breve* enthielt, verschwanden die Tumoren nahezu vollständig. Nager hingegen, die zwar den Checkpoint-Inhibitor erhielten, aber nicht mit *Bifidobacterium*-Arten besiedelt waren, sprachen nur eingeschränkt auf den Arzneistoff an. Erst nachdem wir ihnen diese Bakterien per Fütterung verabreich-

ten, bildeten sich ihre Tumoren zurück.

Forscher in Frankreich haben ähnliche Experimente durchgeführt, freilich mit einem anderen Immun-Checkpoint-Inhibitor. Bei ihnen waren es Mikroben der Bakteriengattung *Bacteroides*, die bei den behandelten Tieren zu einer Rückbildung injizierter Tumoren führten. Bekamen die Tiere ein Antibiotikum, das die Mikroben abtötete, schlug der Checkpoint-Inhibitor weniger effektiv an. In Anbetracht der Tatsache, dass viele Krebspatienten unter anderem mit Antibiotika behandelt werden, sollte dies den Ärzten zu denken geben. Sowohl unsere Ergebnisse als auch die der französischen Forscher sind im November 2015 in der Fachzeitschrift »Science« veröffentlicht worden.

Offensichtlich müssen wir den Bakterien des Mikrobioms und ihrer potenziellen Antitumorwirkung mehr Beachtung schenken, bevor wir Patienten irgendwelche Therapien empfehlen. Während Mikroben wie *Bifidobacterium* gesundheitlich günstig zu wirken scheinen, könnten andere Stämme das Tumorwachstum ankurbeln. Das ist bei Krebsimmuntherapien, die eine sorgfältig austarierte Stimulation der Körperabwehr erfordern, von großer Bedeutung. Der Verzehr von Joghurt übrigens dürfte kaum helfen, um solche Therapien zu unterstützen. Denn Joghurt enthält typischerweise die Spezies *Bifidobacterium lactis* oder *Bifidobacterium bifidum*, die vermutlich anders wirken als die in unseren Mäusestudien verwendeten Arten.

Maria-Luisa Alegre ist Professorin im medizinischen Institut der University of Chicago. **Thomas F. Gajewski** arbeitet ebenda als Professor im pathologischen und medizinischen Institut.

Drei Immunstrategien für die Behandlung von Krebs

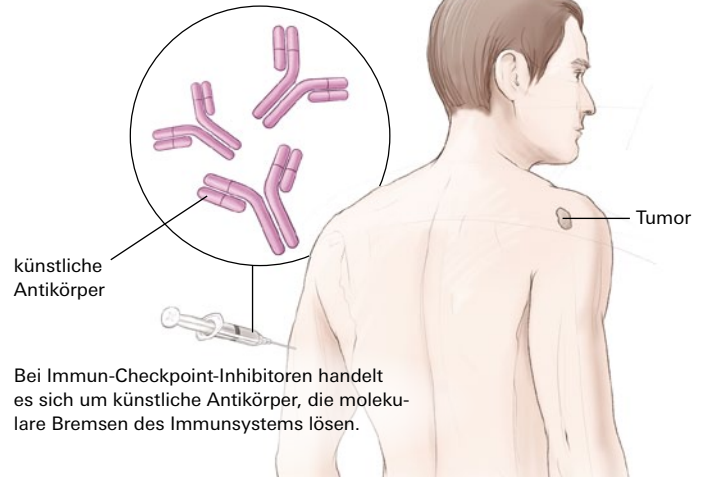
Operation, Bestrahlung und Chemotherapie waren lange die Standardbehandlungen bei Krebs. Wie klinische Studien in den zurückliegenden Jahren jedoch gezeigt haben, lassen sich körpereigene Immunzellen dahingehend ertüchtigen, dass sie Tumorzellen aufspüren und vernichten – eine leistungsstarke Methode, die gängige Krebstherapien ergänzen kann. Die hier erläuterten Ansätze werden sowohl allein als auch in Kombination mit anderen Behandlungen getestet.

Wie verändert die Immuntherapie die Behandlung solider Tumoren?

Tumoren, die in Körpergewebe wuchern, bezeichnet man als solide, da sie eine klumpige Masse darstellen. Oft schaffen sie sich eine Umgebung, die ihr Wachstum fördert, indem sie zum Beispiel sprossende Blutgefäße anlocken. Immun-Checkpoint-Inhibitoren blockieren die immundämpfenden Signale, die von vielen solcher Tumoren ausgehen, und konnten in klinischen Studien bei 20 Prozent der Patienten fortgeschrittene Hautkrebskrankungen eliminieren.

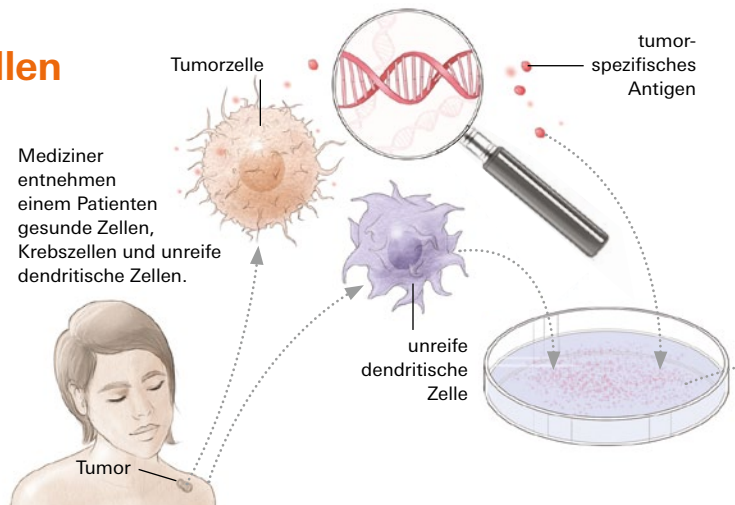
1 Checkpoint-Inhibitoren

Eine ungezügelter Immunreaktion kann so stark ausfallen, dass sie auch gesundes Gewebe zerstört. Der Körper stellt daher immunmodulierende Proteine her, so genannte Immun-Checkpoints, die dem entgegenwirken. Immun-Checkpoints können unter anderem die Aktivität von T-Lymphozyten drosseln. Krebszellen nutzen das, indem sie über diese Proteine das Immunsystem lahmlegen. Neue Arzneistoffe, so genannte Checkpoint-Inhibitoren, legen die Immun-Checkpoints still und entfesseln damit die Körperabwehr.



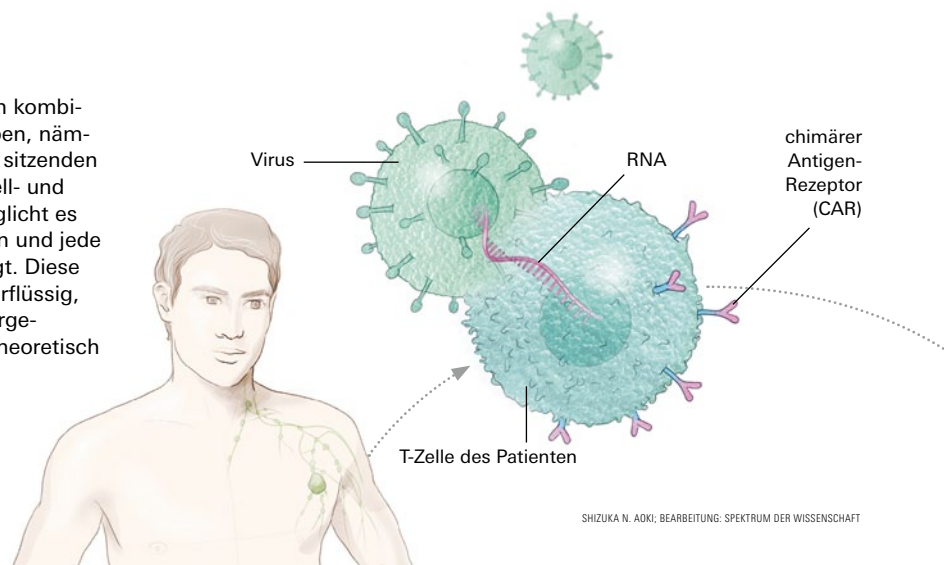
2 Impfung mit dendritischen Zellen

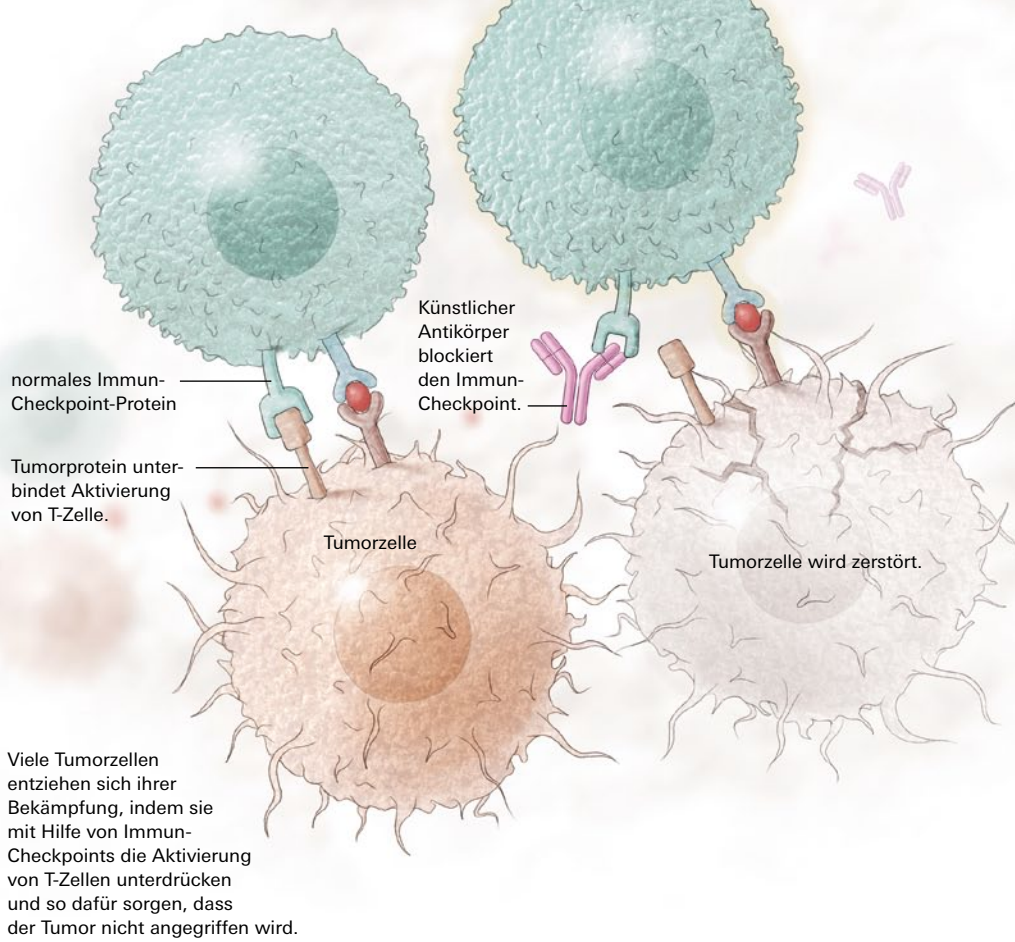
Dendritische Zellen patrouillieren normalerweise im Körper, um körperfremde Stoffe, so genannte Antigene, aufzuspiüren. Falls sie fündig werden, präsentieren sie diese Antigene den CD4⁺- und CD8⁺-T-Zellen, welche ebenfalls an der Körperabwehr mitwirken. Die T-Zellen greifen daraufhin sämtliche Zellen an, die das entsprechende Antigen tragen. Wählt man Antigene, die auf Krebszellen lokalisiert sind, aber nicht auf gesunden Zellen, stattdet man damit dendritische Zellen eines Patienten außerhalb seines Körpers aus und injiziert ihm die so veränderten Zellen zurück, dann impft man ihn damit gegen die Krankheit. Sein Immunsystem wird die Krebszellen nun auf Jahre hinaus aufspüren und vernichten.



3 CAR-T-Zellen

Chimäre Antigen-Rezeptor-T-(CAR-T)-Zellen kombinieren die Merkmale zweier Immunzelltypen, nämlich der T- und der B-Zellen. Die auf ihnen sitzenden Rezeptormoleküle sind Hybriden aus B-Zell- und T-Zell-Rezeptoren. Das CAR-Protein ermöglicht es ihnen, an ausgewählte Antigene zu binden und jede Zelle zu zerstören, die das Zielantigen trägt. Diese Kombination macht Zwischenschritte überflüssig, die typischerweise von B- und T-Zellen vorgenommen werden, was den CAR-T-Zellen theoretisch enorme Schlagkraft verleiht.





Viele Tumorzellen entziehen sich ihrer Bekämpfung, indem sie mit Hilfe von Immun-Checkpoints die Aktivierung von T-Zellen unterdrücken und so dafür sorgen, dass der Tumor nicht angegriffen wird.

Können Darmbakterien die Wirksamkeit von Immuntherapien steigern?

Wie Studien an Mäusen vermuten lassen, befähigt die Anwesenheit bestimmter Bakterienstämme im Darm die Körperabwehr dazu, das Wuchern einiger Tumortypen zu verlangsamen. Zudem wirken Immun-Checkpoint-Inhibitoren bei Nagetieren, deren Mikrobiom solche Bakterien enthält, besser gegen Krebs.

Indem Checkpoint-Inhibitoren die Wechselwirkung zwischen Tumorzellen und Immun-Checkpoints durchkreuzen, lösen sie die Bremsen der T-Zellen, so dass diese den Tumor angreifen können.

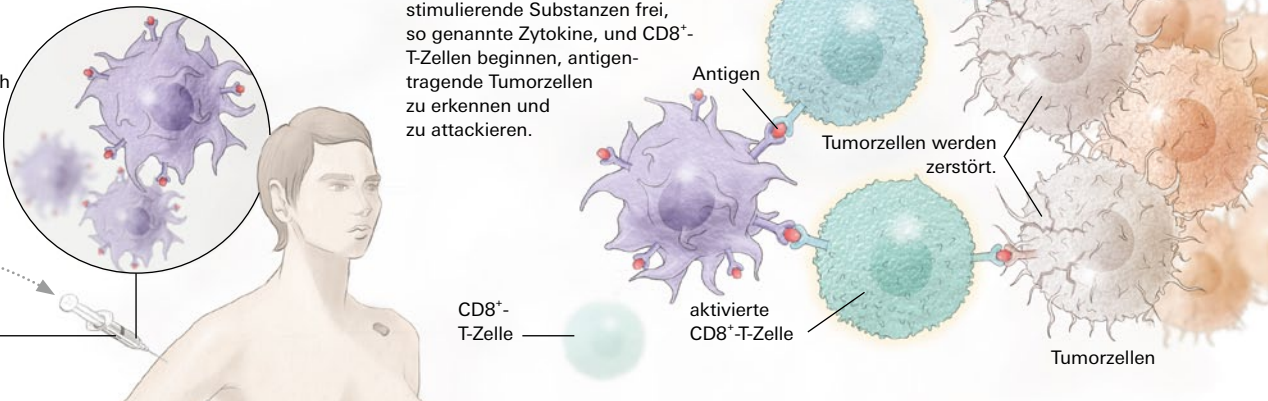
SHIZUKA N. ADAMI, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Wissenschaftler vergleichen entartete mit gesunden Zellen und finden dadurch Antigene, die sich nur auf den ersten befinden. Sie geben diese Antigene dann zu den dendritischen Zellen, welche die Antigene in sich aufnehmen. Die reifen dendritischen Zellen bekommt der Patient zurückinjiziert.

Impfstoff in Form reifer dendritischer Zellen

Reife dendritische Zellen präsentieren die tumorspezifischen Antigene den Zellen der Körperabwehr. CD4⁺-T-Zellen setzen daraufhin immunstimulierende Substanzen frei, so genannte Zytokine, und CD8⁺-T-Zellen beginnen, antigentragende Tumorzellen zu erkennen und zu attackieren.

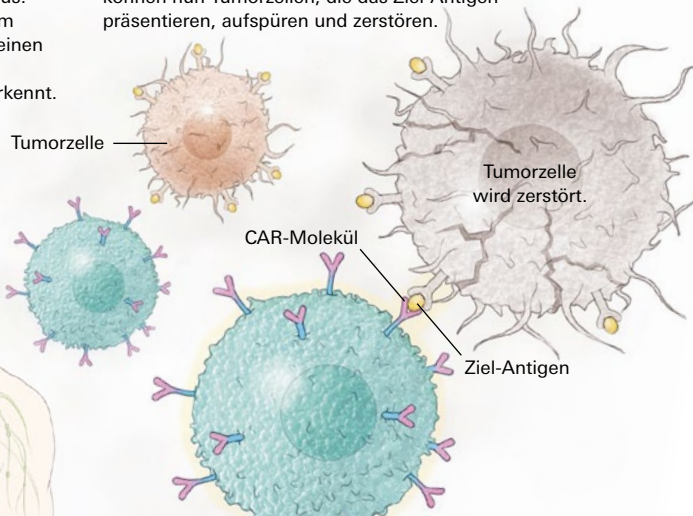
Aktivierte CD4⁺-T-Zelle schüttet Zytokine aus.



Mediziner entnehmen dem Patienten T-Zellen und infizieren sie mit einem gutartigen Virus. Das Virus enthält Erbinformationen in Form von RNA, die es den T-Zellen ermöglicht, einen Oberflächenrezeptor herzustellen, der ein spezifisches Antigen auf der Tumorzelle erkennt.

T-Zellen mit CAR-Molekülen auf der Oberfläche

Die biotechnisch produzierten CAR-T-Zellen können nun Tumorzellen, die das Ziel-Antigen präsentieren, aufspüren und zerstören.



Wie verändern CAR-T-Zellen die Behandlung hämatologischer Tumoren?

Hämatologische Tumoren sind Krebserkrankungen des Blut- und Lymphsystems, insbesondere Leukämien und Lymphome. CAR-T-Zellen können sich weitgehend ungehindert im Blut bewegen, wo auch die entsprechenden malignen Zellen oft zirkulieren. In klinischen Studien eliminieren sie bei 90 Prozent der Patienten, die an aggressiver Leukämie leiden, jede Spur der Erkrankung.

Synthetische Viren aktivieren das Immunsystem

Beim Anwenden von Krebsimmuntherapien stehen Mediziner oft vor dem Problem, dass die von den Tumorzellen präsentierten Antigene denen gesunder Zellen ähnlich sind. Das führt entweder zu schwachen Immunreaktionen oder, wenn die Körperabwehr künstlich entfesselt wurde, zu schweren Komplikationen. Forscher möchten diese Schwierigkeiten nun umgehen, indem sie das Immunsystem von Patienten mit künstlichen Viren infiltrieren (*Nature* 534, S. 396–401, 2016).

Bei bisherigen Verfahren, etwa der CAR-T-Zelltherapie (siehe »Drei Immunstrategien«, S. 38/39), werden Immunzellen außerhalb des Körpers gegen Tumorzellen »abge-

richtet«. Hierfür entnimmt man T-Zellen aus dem Blut, verändert sie, etwa mit genetischen Verfahren, und führt sie dem Patienten anschließend wieder zu. Wie sich diese im Labor modifizierten Zellen dann im Körper auf gesundes Gewebe auswirken, ist schwer vorherzusagen.

Forscher von der Universität Mainz schlagen ein vergleichsweise einfaches Alternativverfahren vor. Sie haben das Immunsystem dreier Krebspatienten »scharf gemacht«, indem sie Nanopartikel, die Viren nachempfunden und mit tumorspezifischer RNA beladen waren, in die Blutbahn injizierten. So gelang es ihnen, intensive Immunantworten gegen die Tumorzellen auszulösen.

Dendritische Zellen hatten die RNA offenbar direkt aufgenommen, exprimiert und so massenhaft Tumorantigene produziert. Dies aktivierte die körpereigenen T-Zellen gegen den Tumor. Besonders effektiv nahmen die dendritischen Zellen die Nanopartikel auf, wenn deren Hüllen elektrisch leicht negativ geladen waren.

Die eingeschmuggelte Tumor-RNA führte außerdem zur Ausschüttung von Alpha-Interferonen, die das Immunsystem ähnlich stimulierten wie bei der Abwehr viraler Infektionen. Diese Ergebnisse sind viel versprechend, harren aber ihrer Bestätigung in größeren Studien.

Bernhard Fleischer ist Biologe und Wissenschaftsjournalist.

abwehr abgeben. Ipilimumab blockt den Immun-Checkpoint CTLA-4, entfesselt so die Immunreaktion und versetzt sie in die Lage, ihre Aufgaben besser zu erfüllen. Der Antikörper gehört somit zu den Immun-Checkpoint-Inhibitoren, einer viel versprechenden Klasse von Krebsarzneistoffen.

Ipilimumab erwies sich als effektives Mittel gegen Lungenkrebs und Melanome, was Pharmaunternehmen dazu veranlasste, weitere Arzneistoffe mit ähnlichem Wirkmechanismus zu entwickeln. Der frühere US-Präsident Jimmy Carter, heute 92 Jahre alt, dessen Melanom bereits in sein Gehirn gestreut hatte, erhielt eine solche Substanz namens Pembrolizumab – und gab Ende 2015 bekannt, alle Tumoren und Metastasen in seinem Körper seien verschwunden.

Viele Stellschrauben bestimmen über den Erfolg der Tumorbehandlung

Bei Michelle Boyer verlief eine solche Therapie bei vergleichbarer Erkrankung leider nicht so erfolgreich. Und das gibt Rätsel auf. Einige Wissenschaftler spekulieren, Carter könne von seinem fortgeschrittenen Alter profitiert haben. Ältere Krebszellen sind stärker mutiert und sollten daher bessere Ziele für das Immunsystem abgeben. Carters Körperabwehr bedurfte deshalb vielleicht nur eines kleinen Anstoßes, um erfolgreich loszuschlagen. Bei anderen (jüngeren) Patienten hingegen gelangen die T-Zellen vielleicht niemals in den Tumor hinein und können demzufolge dort auch nicht entfesselt werden. Bei wieder anderen scheinen die T-Lymphozyten zwar ihren Weg in das entartete Gewebe zu finden, aber der Immun-Checkpoint-Inhibitor wirkt trotzdem nicht – vielleicht weil er nur eine von mehreren Immunblockaden löst. Eine Studie im »New England Journal of Medi-

cine« ergab 2015, dass die Melanomtherapie erfolgreicher verläuft, wenn zwei Checkpoint-Inhibitoren statt nur einem verabreicht werden.

Noch können die Ärzte nicht präzise vorhersagen, welcher Patient auf welche Immun-Checkpoint-Inhibitoren oder Kombinationen derselben ansprechen wird. Boyer und anderen Patienten bleibt deshalb einstweilen nur, verschiedene Therapien auszuprobieren. Derzeit profitieren in klinischen Studien kaum mehr als 20 Prozent der Patienten, die an fortgeschrittenen Melanomen leiden, umfassend von der Checkpoint-Blockade. Bei gut der Hälfte führt die Therapie immerhin zu geringfügigen klinischen Erfolgen. Verwirrend ist, dass manche Tumoren auf Checkpoint-Inhibitoren ansprechen, obwohl sie nur wenige T-Zellen anlocken, während andere Wucherungen, die massenhaft T-Lymphozyten enthalten, offensichtlich nicht auf solche Antikörper reagieren – was vermuten lässt, dass sie das Immunsystem auf andere Weise überlisten.

Die effektive Behandlung eines soliden Tumors kann zum nervenaufreibenden Versuch-und-Irrtum-Prozess werden – so wie bei Boyer. Zwei Jahre nachdem Chirurgen ihren kanzerösen Leberfleck am Rücken entfernt hatten, erfuhr sie, dass der Krebs zurückgekehrt war und in Lungen und Brüste gestreut hatte. Da die Metastasen mittlerweile zu groß waren, um sie operativ zu entfernen, erklärte sich Boyer damit einverstanden, ab 2013 an einer klinischen Studie teilzunehmen, in deren Verlauf sie hohe Dosen an Interleukin-2 (IL-2) injiziert bekam. IL-2 ist ein Peptidhormon, das auf verschiedenen Wegen das Immunsystem anregt und die Krebsbekämpfung unterstützt. Zunächst schien die Behandlung das Tumorwachstum zu stoppen, aber schon

drei Monate später zeigten Untersuchungen, dass der Krebs wieder auf dem Vormarsch war.

Boyer bewarb sich um die Aufnahme in eine zweite klinische Studie; die Behandlung bestand diesmal in einer Kombination des Immun-Checkpoint-Inhibitors Ipilimumab mit dem immunstimulierenden Hormon IL-21. Binnen weniger Wochen zeitigte die Therapie jedoch so massive Nebenwirkungen (Übelkeit, Durchfall und unerträgliche Schmerzen), dass die IL-21-Injektionen abgesetzt wurden. Boyer erhielt aber weiterhin Ipilimumab. Ende 2013 hatten sich einige Tumoren zu vergrößern begonnen, so dass sich die Ärzte für eine Strahlentherapie entschieden, um das Wachstum einzudämmen. Und tatsächlich waren im darauf folgenden Frühjahr einige Wucherungen wieder geschrumpft – dafür aber neue am Kopf und in der Brust erschienen.

Chirurgen entnahmen einen Knoten aus Boyers Brust, und zwei weitere immunstimulierende Therapien schienen die restlichen Tumoren vorerst in Schach zu halten. Im Januar 2015 stellte sich dann aber heraus, dass ein neuer Ansatz erforderlich war: In Gehirn, Brust und Bauchraum hatten sich weitere Krebsherde gebildet. Einen Monat später trat Boyer einer klinischen Studie bei, in der die behandelnden Mediziner einen Checkpoint-Inhibitor mit einem Arzneistoff kombinierten, von dem sie vermuteten, dass er das Tumorwachstum verlangsamt. Zum Zeitpunkt der Drucklegung hatte sich einer von Boyers Tumoren wieder etwas vergrößert, andere hingegen hatten sich etwas zurückgebildet.

Lang genug überleben, bis die richtige Therapiemethode gefunden ist

Unzweifelhaft waren die vielen Behandlungen eine enorme Strapaze für Boyers Körper. Um ihren Rücken zu entlasten, verbrachte sie die meiste Zeit auf einer Couch. In ihrer behandlungsfreien Zeit arbeitet sie, sofern es ihre Konstitution erlaubt, vormittags als Bauingenieurin, sonst lenkt sie sich mit Videospiele ab. Alles in allem bereut sie nicht, sechs verschiedene Immuntherapien ausprobiert zu haben. Ein Arzt sagte ihr einmal, Melanompatienten müssten nicht notwendigerweise auf Anhieb die richtige Behandlungsmethode finden. Wichtig sei vielmehr, lange genug am Leben zu bleiben, bis diese gefunden sei. Das hat Boyer verinnerlicht und sieht es deshalb schon als Erfolg an, wenn eine Therapie den Fortschritt ihrer Krebserkrankung verlangsamt.

Für Ira Mellman, Vizepräsident der Abteilung Krebsimmunologie beim Biotechnologieunternehmen Genentech, sind die Zeiten vorbei, in denen sich Immuntherapieforscher darum sorgen mussten, ob ihre Arbeit irgendwann jemandem helfen würde. Die Antwort lautet unzweifelhaft »Ja«, und so könnten die Mediziner ihre Zeit nun darauf verwenden, nachweislich wirksame Behandlungsansätze weiter zu verbessern. Mellman ist davon überzeugt, dass die Auswahl einer individuell passenden Immuntherapie künftig stringenter und logischer ablaufen wird, als es derzeit der Fall ist. Bei Patienten mit soliden Tumoren könnten die Ärzte zunächst per Biopsie prüfen, ob T-Zellen in den Tumor eingewandert sind. Falls ja, werden sie den Patienten wahrscheinlich mit einem einzelnen Immun-Checkpoint-Inhibitor behandeln oder mit einer Kombination verschiedener. Schon

jetzt hat die FDA mehrere solche Arzneistoffe zugelassen; mehr als ein Dutzend weitere sind in Entwicklung. Falls der Tumor nicht genügend T-Zellen enthält, können die Ärzte verschiedene Techniken anwenden, um seine Infiltration mit T-Lymphozyten zu fördern und das Immunsystem auf die entarteten Zellen aufmerksam zu machen, bevor sie Checkpoint-Inhibitoren einsetzen.

Einige Wissenschaftler ziehen auch in Betracht, Standardtherapien wie Bestrahlung und Chemotherapie einzusetzen, um Immunreaktionen zu provozieren. Das Abtöten einer gewissen Zahl von Tumorzellen mit niedrig dosierter Chemo- oder Strahlentherapie sollte reichlich Zellfragmente aus der Wucherung freisetzen und so die Körperabwehr dazu veranlassen, T-Zellen dorthin zu entsenden. Hier das richtige Maß zu finden, ist allerdings nicht leicht, da ein Zuviel an Chemotherapie und Bestrahlung das Immunsystem unterdrücken kann. Nach einer erfolgreichen Standard-Vorbehandlung könnte die Gabe eines Immun-Checkpoint-Inhibitors dem geschwächten Tumor den Todesstoß versetzen, bevor dieser sich regenerieren kann. Freilich stehen solche Kombinationstherapien noch am Anfang.

Doch je mehr neue Immuntherapien für die Behandlung zugelassen werden, desto stärker rücken ihre finanziellen Kosten in den Blick. Kombinationsbehandlungen sind natürlich noch teurer als die ohnehin schon teuren Einzeltherapien. Der Weltmarkt für Krebsarzneistoffe hat laut dem amerikanischen Marktforschungsunternehmen IMS Health die Marke von 100 Milliarden Dollar pro Jahr überschritten. Krankenversicherungen und Patienten sind weder willens noch fähig, medikamentöse Therapien durchzuhalten, die sich auf gut und gern 150 000 Dollar pro Patient belaufen. Um die Kosten zu senken, streben Pharmaunternehmen unter anderem Verbesserungen im Herstellungsprozess, niedrigere Dosierungen und kürzere Behandlungszeiten an.

Die derzeit verfügbaren Methoden sind im Vergleich zu früher ein enormer Fortschritt, aber längst nicht perfekt. Karen Koehler leidet noch heute unter den Nachwirkungen ihrer Immuntherapie. Sie ermüdet schneller als früher und unternimmt weniger. Dennoch genießt sie ihren Ruhezustand; infolge des Scheiterns ihrer ersten Therapie ist sie aus dem Berufsleben ausgeschieden. Sie hat sich einen Hund angeschafft und besucht regelmäßig das örtliche Gymnasium, um den Schülern bei den Prüfungen zu helfen. Onkologen sind davon überzeugt, dass Krebsimmuntherapien schon bald vielen weiteren Patienten, die bis dato als unheilbar krank galten, ähnliche Chancen auf eine neue Lebensperspektive eröffnen. ◀

QUELLEN

Diverse: 2015 Guidance on Cancer Immunotherapy Development in Early-Phase Clinical Studies. In: *Cancer Science* 106, S. 1761–1771, 2015

Redman, J.M. et al.: Advances in Immunotherapy for Melanoma. In: *BMC Medicine* 14, 10.1186/s12916-016-0571-0, 2016

Sadelain, M. et al.: The Basic Principles of Chimeric Antigen Receptor Design. In: *Cancer Discovery* 3, S. 388–398, 2013

Sivan, A. et al.: Commensal Bifidobacterium Promotes Antitumor Immunity and Facilitates Anti-PD-L1 Efficacy. In: *Science* 27, S. 1084–1089, 2015



EVOLUTION DER AUFSTIEG DER SÄUGETIERE

Paläontologen zeichnen ein völlig neues Bild der frühen Säuger: In etlichen heute ausgestorbenen Gruppen existierten schon zu Zeiten der Dinosaurier unterschiedlichste Formen – darunter »Maulwürfe«, »Biber«, »Raubtiere« und sogar »Gleithörnchen«.

» spektrum.de/artikel/1420971



Das größte Säugetier im Erdmittelalter war *Repenomamus*. Das Raubtier aus dem Gebiet des heutigen China lebte vor 130 Millionen Jahren in der Unterkreide und fraß sogar kleine Dinosaurier – wie in dieser Illustration einen jungen Psittacosaurier.

JAMES GURNEY



Stephen Brusatte (oben) und **Zhe-Xi Luo** sind Paläontologen. Der US-Amerikaner Brusatte arbeitet an der University of Edinburgh in Schottland. Zu seinen Forschungsschwerpunkten zählen die Dinosaurier und ihre Zeitgenossen. Luo stammt aus China und hat eine Professur an der University of Chicago. Sein Spezialgebiet ist die frühe Evolution der Säugetiere, von denen er wichtige Arten selbst entdeckte.



Die Spannung im Saal war greifbar, als der englische Naturforscher und Theologe William Buckland (1784–1856) an jenem Frühwinterabend 1824 seinen Vortrag bei der Londoner Geografischen Gesellschaft begann. Seit Jahren kursierten Gerüchte, Buckland befasse sich mit ein paar riesigen versteinerten Knochen aus einem englischen Steinbruch. Jetzt endlich, nach fast zehnjährigen Studien, verkündete er dem Auditorium das Ergebnis seiner Untersuchungen: Diese Knochen würden von einer kolossalen Echse aus einer früheren Zeit stammen, die er einfach *Megalosaurus* nannte, also »Riesenechse«.

Buckland hatte den ersten Dinosaurier, wie die Gruppe bald hieß, vorgestellt und damit die Begeisterung für diese Giganten der Vorzeit geweckt. Völlig in den Hintergrund geriet dadurch eine andere, ebenso revolutionäre Entdeckung, über die er am selben Abend auch sprach, obwohl er sie als »höchst bemerkenswert« bezeichnete. Beim Sichten weiterer Fossilien, die zusammen mit den *Megalosaurus*-Knochen zum Vorschein gekommen waren, hatte er zwei winzige Kiefer mit Höcker tragenden Zähnen bemerkt, die unverkennbar von mausgroßen Säugetieren stammten. Eigentlich glaubte man jedoch damals, die Säugetiere seien eine junge Schöpfung. Zwischen ihrer Zeit und frühen – von Riesensalamandern und großen Echsen beherrschten, durch Katastrophen beendeten – Erdzeitaltern klaffte nach jener Auffassung eine große Lücke.

Diese beiden kleinen Kiefer ließen zum ersten Mal ahnen, dass auch die Säugetiere eine sehr alte Geschichte haben. Doch wie hatte diese Entwicklung ausgesehen? Selbst als sich später auf der Basis der heutigen Evolutionstheorie das Wissen über die Abstammung und Systematik der Tierwelt verdichtete, blieben viele Fragen zur frühen Entwicklung der Säuger noch bis vor wenigen Jahrzehnten offen. Zunächst: Wann hatten überhaupt die ersten Säugetiere gelebt? Als klar wurde, dass ihr Ursprung tatsächlich weit ins Erdmittelalter zurückreicht, beinahe bis zu den Anfängen der Dinosaurier, überlegten die Forscher, wie diese Gruppe wohl die vielen Jahrmillionen bis zum Untergang der Dinosaurier vor rund 66 Millionen Jahren überstanden hatte, bis dann ihre große Zeit kam.

Insbesondere interessiert Biologen die Evolution der klassischen Säugetiermerkmale – also des Fells, der Milchdrüsen, des großen Gehirns, der scharfen Sinne, des komplexen Gebisses und dergleichen herausragender Kennzeichen. Auch wüssten sie gern, wieso von all den früheren Zweigen später ausgerechnet die Plazentatiere weltweit

Dominanz errangen und eine noch nicht dagewesene Vielfalt und Bandbreite an Formen, Größen und Lebensweisen hervorbrachten. Deren heute mehr als 5000 Arten besiedeln fast die ganze Erde.

Dass die Forscher noch bis vor Kurzem so wenig von der Frühzeit der Säuger wussten, lag an den insgesamt äußerst dürftigen Fossilfunden. Die Situation hat sich in den letzten 15 Jahren aber grundlegend geändert. Eine Welle spektakulärer Ausgrabungen auf verschiedenen Kontinenten vermittelt nun endlich eine recht gute Vorstellung davon, wie diese Gruppe im Schatten der Dinosaurier zunächst klein und unscheinbar auftrat, aber schon damals bald eine Fülle an Formen ausbildete. Wir wissen inzwischen auch, dass sich nach dem Untergang jener Riesenreptilien ein Ast von ihnen unerwartet schnell zu großer Vielfalt und Vorherrschaft über die Tierwelt aufschwang.

Die heutigen Säuger gliedern sich in drei Gruppen: die Eier legenden Kloakentiere oder Monotremata, zu denen Schnabeltier und Ameisenigel zählen; die Beuteltiere oder Marsupialia, deren winzig klein geborene Junge etwa bei den Kängurus in einer Tasche heranwachsen, wo sie zunächst an einer Milchzitze hängen; und die höheren Säuger oder Plazentatiere (Plazentalier), also die Mehrzahl der lebenden Säuger, darunter der Mensch. Im Erdmittelalter gab es diverse weitere Zweige. Aus einigen davon haben sich die heutigen drei Gruppen herausgeschält, andere sind längst ausgestorben (siehe Grafik »Der neue Stammbaum«, S. 46–47; alle im Folgenden erwähnten Namen sind dort angeführt).

Die Säugetiere gingen aus als Cynodonten – Hundszahnsaurier – bezeichneten Reptilien hervor. Diese besaßen noch

Spektakuläre Ausgrabungen der letzten 15 Jahre liefern ein gutes Bild von der Formenfülle der Säugtiere im Schatten der Dinosaurier

viele Reptilienmerkmale, wiesen aber daneben erste Säugercharakteristika auf, etwa im Schädelbau, Kiefergelenk und der Stellung der Gliedmaßen. Jene frühesten Vertreter, die von ihnen abstammten, zählen noch nicht wirklich zu den Säugtieren im engeren Sinn. Deswegen sprechen Forscher von der Stammgruppe der Säuger oder den Stamm-Mammaliaformen (Säugerartigen). Sie nennen sie auch Protosäuger oder Protomammalia. Dennoch ähnelten diese Arten in manchem bereits echten Säugtieren. Die ältesten fossilen Zeugnisse dieser Stammgruppe reichen etwa 210 Millionen Jahre zurück, bis in die Obertrias (späte Trias) – eine evolutionäre Umbruchszeit.

Denn vor rund 250 Millionen Jahren, also nach Evolutionsmaßstäben kurz davor, waren das Perm und damit das Erdaltertum zu Ende gegangen, als massive Vulkanausbrüche das größte bekannte Aussterben der Erdgeschichte auslösten.

Auch die meisten großen Amphibien und Reptilien, die vorher die Tierwelt beherrscht hatten, wurden damals ausgelöscht. In den Freiräumen entwickelten sich viele noch heute bedeutende Tiergruppen: die Frösche, Echsen, Schildkröten, Krokodile, Dinosaurier (von denen die Vögel abstammen); und die Stamm-Mammaliaformen, zu denen die Vorläufer der echten Säugetiere zählen.

Zu den besten Fossilien von Säugerartigen aus der Trias zählt eine Fülle winziger Zähne und Kieferknochen von der Ostküste Grönlands. Ein unerschrockenes Team um den Paläontologen Farish A. Jenkins (1940–2012) von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) barg sie in den 1990er Jahren aus dem gefrorenen Gestein am Flemingfjord. Wegen der Eisbären hatte der Forscher, ehemals Marineoffizier, stets ein Gewehr dabei.

Typisch schon für die frühen Säugerartigen: Ein Milch- und danach nur noch ein einziges Dauergebiss

Die Grönlandfossilien gehören zu den Kuehneotheriiden, Morganucodonten und Haramiyiden – drei Haupttypen der frühen Säugerartigen. Diese Tiere waren alle nicht größer als Mäuse oder Spitzmäuse und schon mit einigen wichtigen Säugermerkmalen ausgestattet. So trugen sie bereits ein Fell, das sie gegen Kälte schützte und über das sie andererseits bei höheren Temperaturen Wärme abzuleiten vermochten. Eine andere wichtige Errungenschaft waren das vereinfachte Scharniergelenk zwischen Kiefer und Schädel sowie die vergrößerten Kieferschließmuskeln. Damit konnten sie kräftiger und präziser beißen und kauen als die Cynodonten, die nur einfach zubeissen und schluckten. Auch die Zähne dieser Mammaliaformen hatten sich verändert: Insbesondere die Backenzähne wiesen Höcker auf, was die Effizienz des Kauens zusätzlich steigerte.

Hand in Hand damit erfolgte eine bahnbrechende Neuerung ihres Zahnwachstums, und das nicht nur bei den frühen Säugetierartigen von Grönland. Die Zähne der Cynodonten wuchsen kontinuierlich, fielen aus und wuchsen nach, und das lebenslang. Doch schon die frühen Mammaliaformen besaßen wie wir nur ein Milch- und ein Dauergebiss. Diese Anpassung hängt eng mit dem namensgebenden Merkmal der Säugetiere zusammen: der Ernährung der Jungen mit Muttermilch. Jungtiere, die noch keine oder nur Milchzähne haben, also noch nicht richtig fressen können, erhalten stattdessen aus speziellen Drüsen eine besonders gehaltvolle Nahrung. Es sieht so aus, als ob schon jene frühen Arten ihren Nachwuchs säugten. Evolutionär hatte das den gewaltigen Vorteil, dass die Kleinen rascher wuchsen und daher eher überlebten. Mit dem Säugen und dem schnellen Wachstum ging ein intensiverer Stoffwechsel einher. Gerade auch nachts konnten solche Tiere unter kälteren Bedingungen als ihre Vorfahren aktiv bleiben.

Bereits diese frühen Formen zeigten Ansätze weiterer Schlüsselmerkmale der Mammalia, darunter Anpassungen an eine gesteigerte Intelligenz und schärfere Sinne. In den letzten zehn Jahren haben Paläontologen computertomografische Aufnahmen der Fossilien studiert und dabei unter anderem Hirnvolumina und den Verlauf von Nervenbahnen visualisiert. Demnach hatten schon die frühen Säugerartigen

vergleichsweise riesige Gehirne entwickelt – obwohl der Unterschied zu den modernen Säugern nochmals beträchtlich ist. Markant sind die vergrößerten Hirnbereiche für das Riechen und Hören. Auch die Areale für Berührungsreize von der Haut und den Haaren haben sich ausgedehnt. Und sogar der empfindliche Hörapparat im Innenohr erfuhr eine Leistungssteigerung: Fortan lag er in einer festen Knochenhöhle und war so von lauten Kaugeräuschen einigermaßen abgeschirmt.

Trotz solcher Vorteile hatten jene kleinen Arten in der Tierwelt der Obertrias nicht viel zu sagen. Vielmehr begannen damals die Dinosaurier und Krokodile, sich zur Herrschaft aufzuschwingen, denn sie entwickelten gigantische Arten, von denen einige an der Spitze der Nahrungsketten standen.

Die Protosäuger setzten dagegen von Anfang an auf Vielfalt. Das hatten Paläontologen ihnen bisher nicht zuge-
traut. Pamela Gill von der University of Bristol und ihre Mitarbeiter beschrieben 2014 recht unterschiedliche Ernährungsweisen, die schon bei den verschiedenen frühen Gruppen auftauchten. Die Forscher hatten Zähne der Fossilien mit Synchrotronstrahlen abgetastet – gewissermaßen geröntgt – und ihre Funktionsweise sowie Gebrauchsspuren mittels technischer Software modelliert. Zudem verglichen sie die Stärke der Kieferknochen. Demnach vermochten die Morganucodonten das harte Außenskelett großer Insekten, etwa Käfer, zu knacken. Dagegen fraßen die Kuehneotheriiden wohl vorwiegend weichere Kost wie zarte Würmer oder kleine Schmetterlinge. Zur dritten Gruppe, den Haramiyiden, fand einer von uns (Luo) heraus, dass sie mit ihren ungewöhnlich beweglichen Kiefern von kleinen Pflanzen Stücke abschneiden und zermalmen konnten.

Lange hatte die Ansicht geherrscht, dass bei den Protosäu-
gern während des größten Teils des Erdmittelalters, also im Trias, im Jura und in der Kreide, evolutionär nicht viel geschah. Die Experten hielten sie für recht unbedeutende, bodenlebende kleine Insektenfresser, die durch das Unterholz huschten. Die zahlreichen neuen Fossilfunde aus aller

AUF EINEN BLICK VERBLÜFFENDE VIELFALT

- 1** Schon lange fragen sich Forscher, wann und wie die Säugetiere zu den dominanten Wirbeltieren wurden. Doch erst Fossilien aus den letzten 15 Jahren geben darüber genaueren Aufschluss.
- 2** Die Mammalia und ihre Stammgruppe profitierten von Anfang an – und weiter im Schatten der großen Dinosaurier – von ihrer hohen Anpassungsfähigkeit an unterschiedlichste Lebensbedingungen.
- 3** Der rasante Aufstieg der Säuger nach dem Untergang der Dinosaurier kam keineswegs aus dem Nichts, sondern basierte auf bereits vorhandenen fortschrittlichen Merkmalen.

Der neue Stammbaum

Ausgestorbene Säugetierlinien brachten zu Dinosaurierzeiten ein so früh unerwartetes Formenspektrum und eine unvermutete Nischenvielfalt hervor. Die meisten im Text als Gattung erwähnten Arten sind hier dargestellt. Die ersten Säugetartigen (Mammaliaformen) erinnern an Spitzmäuse. Zu den wichtigsten Neuerungen, die ihren Nachfahren zum Erfolg verhalfen, zählten Veränderungen von Kiefergelenk und Ohr sowie Anpassungen von Gebiss und Zähnen. Besonders die Theria erwiesen sich darin als überlegen, in verschiedenste Nischen vorzudringen.

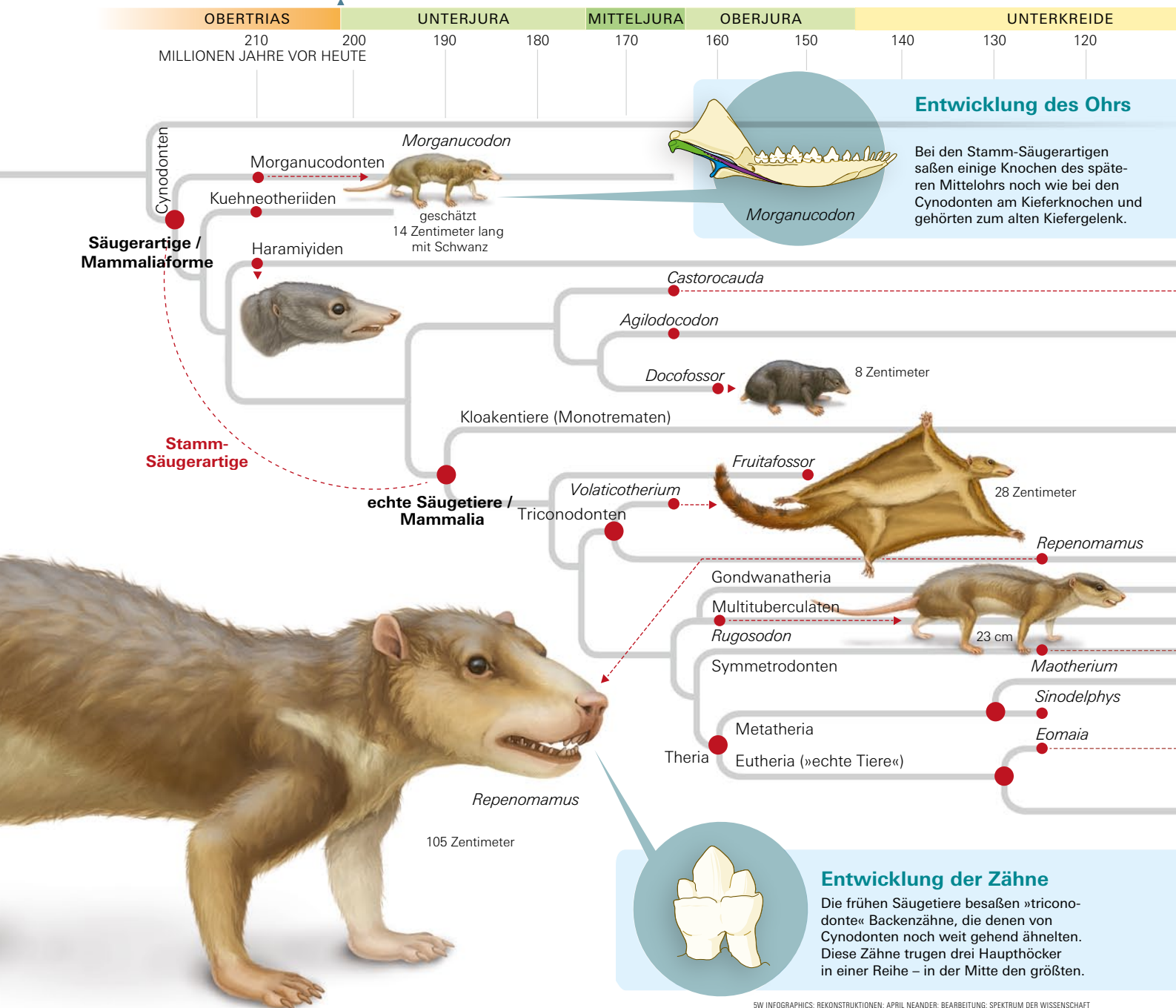
Bescheidene Anfänge

Als unter den Reptilien die ersten Tiere mit säugerähnlichen Merkmalen – die Stamm-Säugetartigen oder Stamm-Mammaliaformen – auftraten, hing die späteren Kontinente noch zusammen.

Frühe Spezialisierung

Unter den Dinosauriern kam die Evolution der Säugetiere keineswegs zum Stillstand wie früher geglaubt. Vielmehr entstanden schon damals verschiedenste Fortbewegungs- und Ernährungsweisen.

Der Superkontinent Pangäa bricht auseinander.

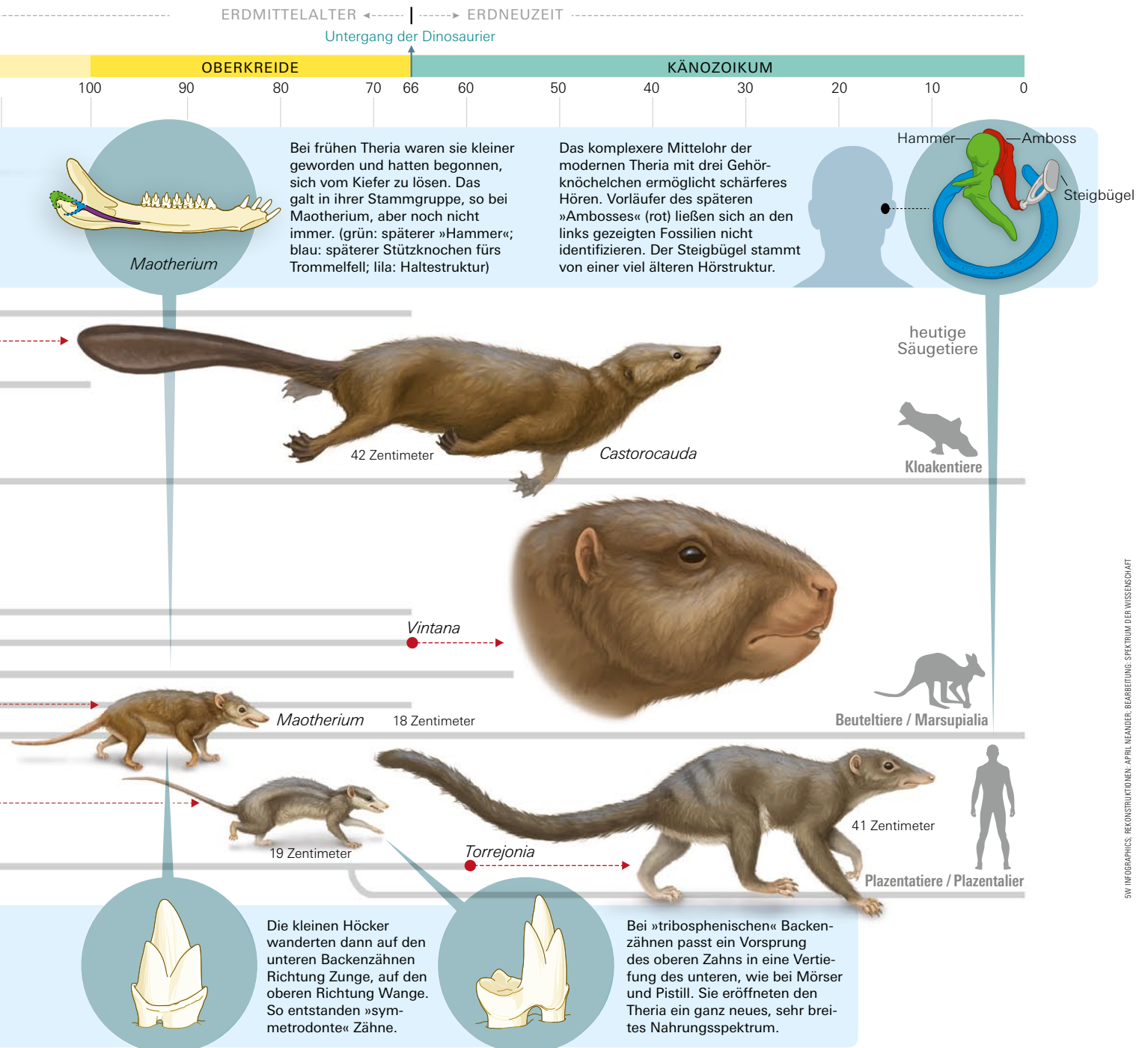


Zur Blüte höherer Säugetiere

Mit den bedecksamigen Pflanzen, den »Blütenpflanzen«, erfuhren die Theria einen kräftigen Evolutionsschub: jener Ast der Mammalia, auf dem sich die Beutel- und die Plazentatiere entwickelten.

Ablösung der älteren Gruppen

Zu Dinosaurierzeiten waren zwar andere Säugergruppen sehr erfolgreich. Doch danach eroberten die Plazentier schnell viele der frei gewordenen Nischen und übernahmen die Vorherrschaft.



Welt ergeben nun ein völlig anderes Bild. Denn viel früher als bisher erwartet kristallisierte sich als ein evolutionäres Leitmotiv der Säugetiere heraus: Sie begegneten veränderten Bedingungen, indem sie unterschiedlichste Lebensweisen ausbildeten – Anpassung durch Hervorbringen von Vielfalt. Diese besondere Fähigkeit zeichnete sie also nicht erst nach dem Untergang der Dinosaurier aus, sondern bereits von Anfang an und auch während der langen Phase, als beide nebeneinander existierten. Vermutlich war hohe evolutionäre Beweglichkeit also seit jeher ein Schlüssel zum Erfolg der Säugetiere.

Dank ihres größeren Gehirns und erhöhten Stoffwechsels, der geschärften Sinne und eines gesteigerten motorischen Geschicks konnten die frühen Säugerartigen auch im Dunkeln und in kühlen Nächten aktiv sein. Möglicherweise überstanden sie dadurch die nächste große geologische Katastrophe, die von der Trias zum Jura überleitete. Denn vor rund 200 Millionen Jahren zerriss der Superkontinent Pangäa. An den größer werdenden Spalten zwischen den sich abzeichnenden neuen Kontinenten brachen Vulkane aus, deren Eruptionen die Atmosphäre vergifteten und Ökosysteme zusammenbrechen ließen. Offensichtlich fanden die Mammaliaformen in diesem Inferno Nischen zum Überleben, die vielen anderen Wirbeltieren versagt waren.

Auch etliche Dinosaurier kamen bei dem Massensterben am Ende der Trias davon. Sie blieben im Jura weiterhin vorherrschend. Die Säugetiere ihrerseits machten nach rund 30 Millionen Jahren, im mittleren Jura, einen Evolutionsschub durch, der wesentlich gewaltiger war als ihr erster in der Obertrias. Jetzt entstand plötzlich eine Anzahl ganz neuer Formen. Insbesondere reiche Fossilfunde aus China belegen diese regelrechte Explosion. Sie stammen aus der Tiaojishan-Formation im Nordosten des Landes. Unter den tausenden bestens erhaltenen Fossilien sind Insekten,

Zu den erstaunlichsten Mitgliedern dieser Tierwelt gehörte *Castorocauda* («Biberschwanz»), ein später Vertreter der Stamm-Mammaliaformen. Mitsamt seinem langen, breiten und flachen Schwanz maß das Tier mehr als 40 Zentimeter. Zwischen den Fingern und den Zehen hatte es eine Schwimmhaut: das erste bisher bekannte schwimmende Säugetier. Eher wie ein Maulwurf lebte dagegen *Docofossor*. Dieses Tier hatte Schaufelhände mit Klauen und grub unterirdische Gänge. Die Fingerknochen waren wie bei den afrikanischen Goldmullen teilweise verwachsen.

Agilodocodon (siehe Bild rechts) wiederum war ein wendiger Baumkletterer. Er durchbiss mit seinen spatelförmig vorstehenden Zähnen die Rinde von Bäumen und schleckte das Harz oder den austretenden Saft. Vielleicht am seltsamsten erscheint *Volaticotherium*, das an ein Gleithörnchen erinnert. Zwischen Armen und Beinen und zum Schwanz hin konnte es eine Haut spannen und so durch die Luft von Ast zu Ast gleiten.

Ein noch stärkerer Evolutionsschub im Jura und der Ursprung der echten Säugetiere

Unerwartet spezialisierte Säuger lebten damals keineswegs nur in China. Luo und John Wible vom Carnegie Museum of Natural History in Pittsburgh (Pennsylvania) beschrieben *Fruitafossor*, ein Fossil aus Colorado. Dieses sehr kleine Tier konnte vermutlich Termitenbauten aufgraben. Kurz gesagt haben die Mammalia, die im Jura neu auftraten, fast alle bedeutenden Lebensweisen hervorgebracht, die wir auch von heutigen kleinen Säugern kennen.

Im Mitteljura, der Phase von vor 174 bis vor 164 Millionen Jahren, schoss die Zahl ihrer Arten in die Höhe. Roger Close, der heute an der University of Birmingham arbeitet, hat ihre aus den Skelettmerkmalen hergeleiteten Abstammungsbeziehungen statistisch analysiert, was aufzeigte, wie rasch sich die anatomischen Veränderungen damals vollzogen. Demnach evolvierten die betreffenden Säuger im Jura wesentlich schneller als die Stamm-Mammaliaformen in der Trias, teilweise sogar doppelt so schnell.

Diese Zeit rasanten Wandels im Jura erlebte zugleich die Anfänge der echten Säugetiere und legte damit den Grundstein für den Stammbaum der heutigen Mammalia. Denn damals trennten sich zuerst die Äste der Kloakentiere und der Theria (nach griechisch Thär/Thäron für »wildes/behaartes Tier«) voneinander. Die Theria wiederum verzweigten sich später in die so genannten Meta- und Eutheria. Zu Ersteren zählen die Beuteltiere, aus Letzteren gingen die Plazentatier oder Plazentalier hervor. Entsprechend werden die Eier legenden Kloakentiere auch als Prototheria bezeichnet.

Viele Linien der hier beschriebenen diversen Säuger des Jura sind längst ausgestorben. Die meisten von ihnen haben im Stammbaum ihren Platz zwischen den Kloakentieren und den Theria. Dennoch lässt sich der Ursprung der heutigen Säugetiere erst anhand der Vertreter jener verschwundenen Zweige einigermaßen begreifen. Denn diese Arten und Formen ermöglichen Rückschlüsse auf Körperbau und Aussehen ihrer Vorfahren – und damit auch auf die Ahnen der höheren Mammalia.

Jene ausgestorbenen Gruppen gediehen im Jura und noch in der darauf folgenden Kreide – während die Vorfah-



FOTOLIA / HL PHOTO

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier »Evolution« finden Sie unter spektrum.de/t/evolution

Federn tragende Dinosaurier sowie mehr als zwei Dutzend Skelette von Säugetieren. Bei vielen von ihnen erkennt man sogar rundum einen Kranz feiner Haare. Diese Tiere lebten vor rund 160 Millionen Jahren in Seen und Wäldern, wo wiederholt Vulkane ausbrachen, deren Lava und Asche sie regelrecht einzementierte.

Verschiedene Forscherteams haben diese Fossilien untersucht, darunter das von Luo und eines von Jin Meng vom American Museum of Natural History in New York. Die Unterschiede im Körperbau zwischen den einzelnen Arten sind verblüffend groß. Sie müssen teils in völlig verschiedenen ökologischen Nischen gelebt haben.



Ein besonders aufschlussreiches Fossil aus Chinas Tiaojishan-Formation: Vor 165 Millionen Jahren kletterte der frühe Säugerartige *Agilodocodon scansorius* in Bäumen, biss Löcher in die Rinde und leckte Harz und austretenden Saft, ähnlich wie heute einige kleine Affen. So früh hatten Forscher baumlebende Säuger nicht erwartet.

ren der heutigen Säuger bereits ihre eigenen Wege gingen. Diese alten Linien experimentierten vielfach mit den gleichen Ernährungs- und Fortbewegungsarten wie damals die Vorgänger der modernen Säuger. Auch innerhalb dieser Linien entstanden unabhängig voneinander viele ähnlich spezialisierte Formen und Lebensweisen. Wie konnte es dann sein, dass sie schließlich komplett untergingen und sich letztlich nur die Vorfahren der heutigen Säugetiere behaupteten?

Vor 145 Millionen Jahren, am Anfang der Kreide, hatten sich die wesentlichen Merkmale der modernen Säuger etabliert. Sie setzten weiterhin auf ein großes Gehirn und schnelles Wachstum. Hinzugekommen war eine Neuerung, die auf den ersten Blick geringfügig erscheinen mag: so genannte tribosphenische Backenzähne (siehe »Der neue Stammbaum«, S. 46–47, Bild rechts unten). Dabei passt ein Auswuchs des jeweils oberen Zahns in eine Einbuchtung des gegenüberstehenden unteren. Beim Zermahlen der Nahrung arbeiten sie zusammen wie Mörser und Pistill.

Solche Zähne waren besonders vielseitig und wandlungsfähig. Ihren Besitzern eröffnete das völlig neue Ernährungsmöglichkeiten. Die Theria begannen sich denn auch bald in diverse Richtungen auseinanderzuentwickeln und spalteten sich in die Vorläufer der Plazentalier und der Beuteltiere auf. Fossilien von ganz frühen, noch recht ursprünglich aussehenden Vertretern dieser beiden Linien kennen wir aus China. Vor deutlich mehr als 125 Millionen Jahren lebten sie am Waldboden sozusagen unter den Füßen von gefiederten Dinosauriern.

Obwohl diese Pioniere der Theria also auf jeden Fall bereits in der frühen Kreide lebten, ließ deren Blütezeit noch lange auf sich warten. Sie waren wenig zahlreich und selten größer als Rennmäuse. Während der ersten 30 Millionen Jahre der Kreide bestimmten dafür die etwas urtümlicheren Triconodonten und Symmetrodonten die Säugerszene, die an ihre Erfolge im Jura anknüpften. Zu ihnen zählen die größten Säugetiere des Erdmittelalters. So war *Repenomamus* mehr als einen Meter lang und wog 14 Kilogramm. Das

ein wenig an einen Vielfraß (Bärenmarder) erinnernde Raubtier lebte in der Unterkreide in China und fraß sogar junge Dinosaurier, wie es versteinertes Mageninhalt verrät (siehe auch Bild S. 42–43).

Ein Ereignis ganz anderer Art gab der Säugerevolution mitten in der Kreide eine völlig neue Wendung: Die bedecksamigen Pflanzen waren entstanden – die Angiospermen, oft nicht ganz korrekt Blütenpflanzen genannt. Sie breiteten sich damals weltweit aus. Heute stellen sie einen Großteil unserer gewohnten Flora, der Sträucher und Bäume, »Blumen« und Gräser dar. Nicht erst wir ernähren uns von ihren Blüten und Früchten, Sprossen und Blättern. Sie boten den damaligen Säugetieren nie dagewesene Futterquellen, darunter nicht zuletzt eine Fülle angelockter Insekten. Die tribosphenischen Backenzähne der Theria, die sowohl schneiden wie mahlen konnten, eigneten sich bestens dafür, sich an die neue Nahrungspalette anzupassen, so dass diese Säugergruppe nun Aufschwung bekam. Unmodernere Tiere wie *Repenomamus* mit seinem altmodischen Gebiss konnten dem anscheinend nicht genug entgegensetzen. Nach dem Ende der Kreide waren sie verschwunden.

Doch die Theria bekamen im Erdmittelalter von zwei anderen Seiten Konkurrenz: von zwei primitiveren Säugergruppen, die ebenfalls komplexe Gebisse entwickelten, womit sie die neuen Pflanzen schneiden und zermahlen konnten.

Schon im Jura waren die Multituberculaten entstanden, die »Nager des Erdmittelalters«. Mit den modernen Nagetieren sind sie nicht näher verwandt, hatten aber eine ähnliche ökologische Bedeutung. Mit ihren vorstehenden Vorderzähnen, ihrer Maus- bis Rattengröße und der Körperform erinnern sie etwas an moderne Nager, ernährten sich auch ähnlich wie sie. Dieser Zweig der Mammalia blühte in der späten Kreide auf, überschwemmte geradezu die nördlichen Kontinente und gilt mit seinen diversen Lebensformen als die erfolgreichste Säugergruppe jener Zeit. Das haben Gregory P. Wilson von der University of Washington in Seattle sowie David Grossnickle von der University of Chica-

go mit umfangreichen Statistiken aufgezeigt. Die Multituberculaten bildeten damals viele verschiedene und zunehmend größere Arten aus. Quasi angespornt durch die Ausbreitung der Bedecktsamer und deren stetig verfeinerte Anpassungen entwickelten sie immer ausgeklügeltere Backenzähne. Diese Gruppe starb offenbar erst vor rund 34 Millionen Jahren aus, also lange nach dem Ende der Dinosaurier.

Auf den südlichen Kontinenten konkurrierten in der späten Kreide anscheinend die Gondwanatheria mit den echten Theria. Über sie wissen Paläontologen noch sehr wenig. Jahrzehntlang war von ihnen hauptsächlich bekannt, dass sie – ähnlich wie Pferde und Kühe – Backenzähne mit hoher Krone besaßen, die sich lebenslang von unten nachschob. Demnach fraßen sie harte Pflanzenkost, was die Zähne stark abrieb. Den ersten Schädel fanden Forscher um David Krause von der Stony Brook University (US-Bundesstaat New York) 2014 in Madagaskar. Sie taufte das recht große Tier, das ganz am Ende der Kreide lebte und dessen Kopf dem von Bibern ähnelte, *Vintana*. Es könnte die kurz davor entstandenen ersten Gräser gefressen haben.

Die fast unverzügliche Ablösung der Dinosaurier nach deren 150 Millionen Jahre währenden Herrschaft

Direkt vor dem dramatischen Ende der Kreide vor rund 66 Millionen Jahren ging es den Säugetieren im Ganzen ziemlich gut. Seit ihren Anfängen in der Trias vor mehr als 200 Millionen Jahren hatten sie einen langen Weg zurückgelegt und dabei diverse Nischen gefunden. Noch hielten sie sich lieber im Unterholz auf und fügten sich in Nahrungsnetze ein, an deren Spitze gigantische Raubsaurier standen, allen voran *Tyrannosaurus rex* (siehe **Spektrum** November 2015, S. 20). Aber sie hatten unter anderem die Theria – die Vorläufer der heutigen Säugetiere – mit vielen Insekten fressenden Arten hervorgebracht, und daneben sowohl die Multituberculaten als auch die Gondwanatheria, welche beide die damals modernsten Pflanzen zu verwerten verstanden und wichtige Glieder der Nahrungsnetze waren.

Als ein großer Asteroideneinschlag gewaltige Naturkatastrophen auslöste – was die Lebensbedingungen auf der Erde binnen Tagen und Wochen umstürzte und sich massiv auf das Weltklima auswirkte –, war der Untergang der Dinosaurier nach 150 Millionen Jahren Herrschaft besiegelt. Von ihnen überlebte nur eine kleine Gruppe, die der Vögel. Auch die Säugetiere traf es hart. Das belegt ein amerikanisches Forschungsprogramm, deren Mitarbeiter seit 50 Jahren in Montana akribisch Fossilien aus der betreffenden Zeit sammeln. Zunächst lief es unter William Clemens von der University of California in Berkeley; inzwischen leitet es Gregory Wilson aus Seattle.

Tatsächlich gingen viele der größeren Säugetiere gleichzeitig mit den Dinosauriern zu Grunde. Ebenso verschwanden Arten mit spezialisierter Ernährungsweise. Fast wären auch die Metatheria (die Beuteltiere und ihre Verwandten) ausgestorben, die in der Oberkreide gerade aufzublühen begonnen hatten.

Doch einige wenige von ihnen konnten überleben. Sonst gäbe es heute weder Kängurus noch Koalas. Zu den übrigen Säugern, die das Inferno überstanden, zählten einige der

ersten Plazentatiere: also Eutheria, die ihre Jungen in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstand gebären und bis dahin über eine gut ausgebildete Plazenta ernährten.

DNA-Stammbäumen zufolge war ein gemeinsamer Vorfahr der Plazentalier zwar schon in der Kreide entstanden. Doch ihre wichtigsten modernen Untergruppen, wie etwa Nagetiere oder Primaten, differenzierten sich erst später aus. Der Hintergrund für ihren plötzlichen Aufschwung erscheint offensichtlich: Als ihnen *Tyrannosaurus* und Co nicht mehr im Weg standen, hatten sie sozusagen freie Bahn und drangen nach dem bewährten evolutionären Muster der Mammalia binnen kurzer Zeit in alle möglichen Nischen vor.

Die Rasanz dieser Evolution – fast schon eine Revolution – zeigt sich nirgends deutlicher als an Fossilien der Nacimiento-Formation in New Mexico. Dies ist ein karges, wegen der unterschiedlichen Ablagerungen zartbunt gestreiftes Hügelland mit Schichtungen von den ersten Jahrmillionen direkt nach dem Dinosaurieruntergang. Einer von uns (Brusatte) hat in diesen »Badlands« an Feldforschungen teilgenommen, um im Einzelnen zu begreifen, was damals vor sich ging. Unter anderem wollte er genauer wissen, welche Säugetiere den Asteroideneinschlag überlebt hatten und mit welchen Ernährungs- und Verhaltensmustern sie die schwierigen Bedingungen danach durchstanden.

Sein Kollege Thomas E. Williamson vom New Mexico Museum of Natural History & Science erforscht jene Gesteinsformation seit mehr als 25 Jahren. Er hat dort tausende Fossilien gefunden, meist Kiefer und Zähne, und dank seines fotografischen Gedächtnisses hat er von fast jedem einzelnen Stück eine genaue Vorstellung! Es sieht so aus, als hätten die Plazentalier gewissermaßen nur auf einen zündenden Funken gewartet. Denn sie entfalteten sich nach geologischen Maßstäben fast augenblicklich: praktisch binnen Jahrtausenden. Schon 500 000 Jahre am Ende der Kreide hatten sie unzählige neue, völlig verschiedene Arten hervorgebracht, darunter spitzmausgroße Insektivoren, Fleischfresser mit Säbelzähnen und Pflanzenfresser, so groß wie Kühe. Das heißt: Als sich die Chance bot, übernahmen die Plazentatiere den Planeten unverzüglich.

Williamson barg in New Mexico auch ein Skelett von einem etwa welpengroßen Tier: *Torrejonia*. Betrachtet man sein graziles Skelett, die schlanken Gliedmaßen und die langen, dünnen Finger und Zehen, kann man sich gut vorstellen, wie dieses schlaksige Wesen in den Bäumen umhersprang und dabei um Zweige und Äste griff. Dies war einer der ersten Primaten – vor 63 Millionen Jahren! ◀

QUELLEN

Luo, Z.-X. et al.: A Jurassic Eutherian Mammal and Divergence of Marsupials and Placentals. In: *Nature* 476, S. 442–445, 2011

Luo, Z.-X et al.: Evolutionary Development in Basal Mammaliaforms as Revealed by a Docodontan. In: *Science* 347, S. 760–764, 2015

Meng, Q.-J. et al.: An Arboreal Docodont from the Jurassic and Mammaliaform Ecological Diversification. In: *Science* 347, S. 764–768, 2015

Williamson, T. E. et al.: The Origin and Early Evolution of Metatherian Mammals: The Cretaceous Record. In: *ZooKeys* 465, S. 1–76, 2014



SWINY KUMAR & SUSANNE SCHULTE (WWW.FLORIAN-FREISTETTER.DE/BILDER.HTML) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVE COMMONS.ORG/LICENSES/3.0/LEGALCODE)

FREISTETTERS FORMELWELT DIE FREIHEIT DER IMAGINÄREN ZAHLEN

In der Mathematik existiert alles, was man sich vorstellen kann. Es darf nur keinen logischen Widerspruch erzeugen!

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

» spektrum.de/artikel/1420979

Das wichtigste Werkzeug, das der Naturwissenschaft zur Verfügung steht, ist die Mathematik. Sie ist die einzige Sprache, mit der sich die Phänomene unserer Welt objektiv beschreiben und erklären lassen. »Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben«, sagte schon Galileo Galilei. Aber das sollte doch eigentlich überraschen, denn die Mathematik ist nicht an die Realität unserer Welt gebunden. Ihre einzigen Grenzen sind die Grenzen der Logik. Was auch immer man sich nur vorstellen kann, existiert in der Mathematik, sofern es keinen logischen Widerspruch erzeugt! Man hat jede Freiheit, alles zu erfinden, was einem just in den Sinn kommt – egal, ob es irgendeine konkrete Entsprechung in der Realität hat oder nicht.

Gerade diese Freiheit macht die Mathematik so bedeutsam, und sie lässt sich nicht besser illustrieren als durch diese Formel:

$$i^2 = -1$$

Eine Zahl i wird hier mit sich selbst multipliziert – und das Ergebnis ist negativ. Ein innerer Widerspruch, so scheint es. Denn eigentlich besagen die Regeln der Multiplikation, dass eine Quadratzahl immer nur positiv sein kann, denn auch minus mal minus ergibt plus.

Was aber soll man machen, wenn man eine Gleichung vor sich hat, die eine negative Quadratzahl verlangt? Zum Beispiel $x^2 + 1 = 0$. Sieht doch recht harmlos aus, aber wenn man die Gleichung nur ein wenig umformt, gelangt man zu $x^2 = -1$ und steht vor dem Problem, ein x zu finden, das nicht existiert.

Man kann so etwas schlicht ignorieren. In der Naturwissenschaft ist das oft sogar sinnvoll. Wenn Gleichungen Ergebnisse liefern, die keine Entsprechung in der Realität haben können – zum Beispiel, weil sie eine negative Masse oder Ähnliches beschreiben –, dann kann man so tun, als gäbe es diese Resultate nicht. Aber die reine Mathematik ist viel freier. Hier kann man einfach eine

Zahl erfinden, welche die scheinbar unlösbare Gleichung doch löst. Genau das haben italienische Mathematiker im 17. Jahrhundert getan, als sie die imaginären Zahlen schufen. Die oben präsentierte Formel definiert die imaginäre Einheit i : die Wurzel aus minus 1.

Als ich in meiner Jugend in einem populärwissenschaftlichen Buch das erste Mal von dieser Erweiterung des Zahlenraums las, war ich mehr als nur fasziniert. Diese draufgängerische Courage begeisterte mich geradezu: Wenn sich eine Gleichung mit den vorhandenen Zahlen nicht lösen lässt, dann erfindet man halt einfach neue, mit denen das funktioniert, fertig! Die imaginären Zahlen waren für mich fast schon ein Erweckungserlebnis, das mir zeigte, wie wenig echte Mathematik mit dem schnöden Rechnen zu tun hat, das ich aus dem Schulunterricht kannte. In diesem Augenblick begann meine Liebe zur Mathematik, die bis heute nicht verschwunden ist.

So wie auch die imaginären Zahlen. In den folgenden Jahrhunderten nach ihrer Kreation haben die Mathematiker nach und nach erforscht, wie man damit rechnen und arbeiten kann. Als sie die Eigenschaften der seltsamen Erfindung untersuchten, stellten sie fest, dass diese vielfältiger sind als gedacht. Denn auch wenn es für negative Quadratzahlen keine Entsprechung in der Natur gibt, kann man sie wunderbar dazu verwenden, die Natur zu beschreiben. Die berühmte Schrödingergleichung zum Beispiel, mit der Quantenmechaniker den Zustand eines physikalischen Systems berechnen, benutzt imaginäre Zahlen. Auch in der Radioastronomie, der Physik rotierender Objekte und in vielen anderen Bereichen kommt man heute nicht ohne diese aus.

Die Möglichkeit zur kreativen Freiheit wie bei der Erfindung der imaginären Zahlen erlaubt es der Mathematik, über Hindernisse »hinwegzufliegen«, wie es die Mathematikerin Eugenia Cheng formulierte. Und dann von dort aus Brücken zu bauen, die von der Naturwissenschaft besritten werden können.

ASTRONOMIE GIBT ES PLANET X?

Im Kuipergürtel, am Rand des Sonnensystems, tummeln sich zahlreiche eisige Felsbrocken, von denen einige sehr ungewöhnliche Bahnen aufweisen. Manche Astronomen schließen daraus auf die Existenz eines noch unbekanntem Planeten weit außerhalb des bisher bekannten Sonnensystems.

» spektrum.de/artikel/1420976

RON MILLER

Die Entdeckung mehrerer seltsamer Himmelskörper im Kuipergürtel jenseits der Neptunbahn deutet auf die mögliche Existenz eines bislang unbeobachteten massereichen Planeten hin – der sogar einen eigenen Mond besitzen könnte.



ROY MILLER



Michael D. Lemonick ist Autor des 2012 erschienenen Buchs »Mirror Earth: The Search for Our Planet's Twin«. Er war 21 Jahre lang Wissenschaftsautor beim Magazin »Time« und ist jetzt Redakteur bei »Scientific American«.

► Jenseits der Plutobahn scheint Seltsames vorzugehen. Seit mehr als zwei Jahrzehnten wissen die Astronomen, dass der Zwergplanet seine Bahn am Rand des Sonnensystems nicht allein zieht. Er gehört einer großen Wolke eisiger Objekte an, dem so genannten Kuipergürtel (englisch: Kuiper-Belt). Eine Hand voll dieser Kuiper-Belt-Objekte oder KBOs verhält sich jedoch anders als der Rest von ihnen, anders als die Planeten oder auch die meisten Asteroiden zwischen Mars und Jupiter. Ihre Umlaufbahnen sind extrem in die Länge gezogen und unterscheiden sich dadurch ganz wesentlich von den nahezu kreisförmigen der meisten planetarischen Körper.

Bis zu einem Dutzend KBOs weisen solche Bahnen auf, die auch in einer weiteren Hinsicht ungewöhnlich sind. Wie die Orbits aller Objekte im Kuipergürtel sind sie gegenüber der Ebene geneigt, in der sich die Planeten unseres Sonnensystems befinden. Doch im Gegensatz zu den gewöhnlichen KBOs kreuzen diese besonderen Himmelskörper die Planetenebene immer genau dann, wenn sie der Sonne am nächsten sind – im Perihel.

Die Orientierung der Bahnellipsen dieser Objekte – fachsprachlich die Argumente ihrer Perihelie – ist also bemerkenswert ähnlich. »Wir würden erwarten, dass sich die Perihel-Argumente im Lauf der Geschichte des Sonnensystems zufälliger verteilen«, sagt der Planetenforscher Scott Sheppard von der Carnegie Institution for Science in den USA. Vielleicht ist es nur Zufall, dass einige Objekte nahezu identische Bahnorientierungen besitzen. Das entspricht der Wahrscheinlichkeit, beim Werfen einer Münze zehnmal hintereinander »Kopf« zu erhalten. Das ist ziemlich ungewöhnlich, aber keineswegs ausgeschlossen.

AUF EINEN BLICK WELTEN HINTER NEPTUN

- 1 Eine Reihe weit entfernter, eisiger Himmelskörper umrundet die Sonne auf merkwürdigen Bahnen. Einige Forscher ziehen daraus den Schluss, es könne weitere, bislang unbekannte Planeten im Sonnensystem geben.
- 2 Die Hinweise unterstützen ihrer Ansicht nach die Idee, dass außerhalb der Neptunbahn eine oder mehrere »Supererden« mit der zwei- bis zehnfachen Erdmasse existieren.
- 3 Solche Objekte lassen sich mit den heutigen Teleskopen nicht beobachten; doch künftige Observatorien könnten sie aufspüren.

sen. Es könnte allerdings auch bedeuten, dass die Münze gezinkt ist.

Ähnlich steckt vielleicht bei diesen speziellen KBOs irgendetwas anderes hinter dem Phänomen, das sie auf ihre eigenwilligen Bahnen zwingt. Das könnte ein großer, bislang unbekannter Planet sein, der deutlich massereicher als die Erde ist und sich am Rand des Sonnensystems versteckt. Wenn ein solcher »Planet X« existiert, würde er seine Bahn mindestens zehnmal weiter von der Sonne entfernt ziehen als Neptun. Damit wäre er zu weit von uns entfernt und zu leuchtschwach, um sich selbst mit den größten heutigen Teleskopen aufspüren zu lassen. Doch seine beachtliche Masse sollte einen gravitativen Einfluss auf den Rest des Sonnensystems ausüben – und könnte so die von den Astronomen beobachteten, seltsamen Umlaufbahnen verursachen.

»Bislang haben wir keinen endgültigen Beweis dafür, dass dort draußen ein Himmelskörper von der Masse eines Planeten existiert«, sagt Nathan Kaib, Experte für Planetenentstehung an der Carnegie Institution. »Aber es geschieht dort etwas Merkwürdiges, das wir nicht verstehen.«

Die Geschichte der Astronomie kennt einige Beispiele von einst unsichtbaren Planeten, deren Existenz die Himmelforscher aus ungewöhnlichen Umlaufbahnen anderer Objekte ableiteten. Manche waren tatsächlich große Entdeckungen. Doch es gab auch falsche Fährten.

Verborgenen Welten auf der Spur – auch Uranus, Neptun und Pluto blieben lange unentdeckt

Erstmals suchten Astronomen zu Beginn des 19. Jahrhunderts nach einem verborgenen Planeten in unserem Sonnensystem. Damals waren immer mehr Wissenschaftler davon überzeugt, dass Uranus, den William Herschel 1781 zufällig entdeckt hatte, sich nicht gemäß dem newtonschen Gravitationsgesetz bewegte. Als Ursache dafür vermuteten viele die Schwerkraft eines massereichen, noch unentdeckten Planeten. Schließlich spürte der deutsche Astronom Johann Galle 1846 den Gasriesen Neptun auf, und zwar nahezu exakt an jener Position, die sein französischer Kollege Urbain Le Verrier vorausgesagt hatte. – Sehr wahrscheinlich hatte übrigens bereits Galileo Galilei 1612 mit seinem kleinen, rudimentären Teleskop Neptun gesehen, aber angenommen, es handle sich um einen Stern.

Anfang des 20. Jahrhunderts begann dann der Aristokrat Percival Lowell aus Boston an seiner Privatsternwarte in Flagstaff, Arizona, mit der Suche nach einem weiteren verborgenen Himmelskörper. Diesmal lieferten Anomalien in den Umlaufbahnen sowohl von Neptun als auch von Uranus Hinweise auf die Existenz eines weiteren Planeten. Im Jahr 1930 stieß Clyde Tombaugh, ein junger Assistent am Lowell-Observatorium, tatsächlich auf einen neuen Himmelskörper nahe der berechneten Position – geradezu eine Wiederholung der Entdeckung von Uranus.

»Die Kugel, möglicherweise größer als Jupiter und 4 000 000 000 Meilen entfernt, entspricht den Vorhersagen«, verkündete die »New York Times« am 14. März 1930. Doch das tat sie keineswegs. In den folgenden Jahrzehnten stellte sich heraus, dass Pluto nicht nur kleiner als Jupiter ist, sondern sogar kleiner als der Erdmond. Seine geringe

Anziehungskraft konnte daher unmöglich die Anomalien der Umlaufbahnen von Neptun und Uranus erklären. Und das war auch gut so, denn diese verschwanden mit weiteren Beobachtungen wieder. In diesem Sinne beruht Plutos Entdeckung eigentlich auf einer falschen Annahme.

Dennoch war sie von großer Bedeutung. In den 1980er Jahren keimte unter den Forschern der Verdacht auf, dass Pluto nicht einfach ein winziger Planet ist, der einsam seine Bahn in den frostigen Außenbereichen des Sonnensystems zieht. Wie wir heute wissen, handelt es sich bei ihm um den hellsten Vertreter einer umfangreichen Population von Objekten in einer Region, die wir heute als Kuipergürtel bezeichnen. 1992 spürten Astronomen auf Hawaii das erste weitere Kuipergürtel-Objekt auf. Inzwischen kennen sie etwa 1500 von ihnen. Mit der Entdeckung von Eris im Jahr 2005, die ähnlich groß wie Pluto und sogar deutlich massereicher als dieser ist, befürchtete man, die Anzahl der Planeten im Sonnensystem könnte unüberschaubar anwachsen. Um dem vorzubeugen, entzog die Internationale Astronomische Union (IAU) Pluto 2006 den Planetenstatus. Seither gelten Pluto, Eris und andere ähnliche Objekte als Zwergplaneten.

Die Entdeckung des Kuipergürtels macht zugleich die aktuelle Suche nach einem Planeten X plausibel. Denn der kosmische Trümmerhaufen hilft zu erklären, wie ein solches Objekt sich überhaupt so weit von der Sonne entfernen konnte, dass es für uns bislang nicht sichtbar ist. Computersimulationen zeigen, dass der Kuipergürtel vermutlich in der Region entstanden ist, in der heute Neptun seine Bahn zieht. Irgendetwas muss die KBOs nach außen gestreut haben. So gelangten die Astronomen zu der Theorie, es habe in der Frühzeit des Sonnensystems, als sich die Planeten gerade erst in der rotierenden Gas- und Staubscheibe um die junge

Einige Himmelskörper besitzen auffällig ähnliche Umlaufbahnen. Planet X könnte diese synchronisiert haben

Sonne gebildet hatten, eine chaotische Phase gegeben, die das Planetensystem kräftig aufmischte. In jener unruhigen Epoche haben sich die Bahnen von Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun wahrscheinlich um mehrere hundert Millionen Kilometer verschoben. Und dabei haben sie mit ihrer Schwerkraft auch die KBOs nach außen geschleudert. Manche Simulationen deuten sogar auf die Existenz eines fünften Gasriesen hin, der bei diesem Prozess ganz aus dem Sonnensystem herausgeworfen wurde.

Vielleicht gab oder gibt es aber auch einen felsartigen schweren Planeten, der dort draußen seine Bahnen zieht. Sollte sich damals etwa eine Supererde in der heutigen Region von Jupiter und Saturn gebildet haben, könnte sie ebenfalls weit nach außen gedriftet sein oder das Sonnensystem ganz verlassen haben. Das zeigen Computersimulationen von Ben Bromley von der University of Utah

SERIE

Unbekanntes Terrain im Sonnensystem

Teil 1: Oktober 2016

Gibt es Planet X?

von Michael Lemonick

Teil 2: November 2016

Voyager blickt über den solaren Tellerrand

von Stamatios M. Krimigis und Robert B. Decker

Teil 3: Dezember 2016

Rosetta – Eine Mission geht zu Ende

von Gerhard Schwehm

und Scott Kenyon vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Doch wenn die Planetenwanderung früh genug stattgefunden hätte – innerhalb von zehn Millionen Jahren nach der Planetenentstehung –, also bevor das restliche Gas aus dem Sonnensystem herausgeblasen wurde, »hätte die Supererde mit dem Gas gravitativ wechselwirken und weit draußen in einer einigermaßen kreisförmigen Bahn zur Ruhe kommen können«, so Bromley. Und nachdem es unter den Tausenden der mittlerweile bekannten Exoplaneten viele Supererden gibt: Warum sollte eine solche nicht auch einst unsere Sonne umkreist haben?

Eine weitere Möglichkeit für einen Planeten X wäre den beiden Forschern zufolge die Entstehung einer Supererde in einem Sonnenabstand von 200 Astronomischen Einheiten (1 Astronomische Einheit, AE = Abstand Erde–Sonne = 150 Millionen Kilometer). Zum Vergleich: Neptun zieht seine Bahn 30 AE von der Sonne entfernt. Dies wäre aber nur möglich, wenn dort draußen ausreichend Material wie Eis und Gesteinsbrocken vorhanden gewesen wäre.

»Schaut man sich nahe, sonnenähnliche Sterne an«, sagt Kenyon, »so sieht man bei einigen von ihnen Staubscheiben, die bis zu 200 Astronomische Einheiten hinausreichen.« Zwar gäbe es keine Beweise dafür, dass bei diesen Sternen Supererden in so großen Entfernungen entstanden sind, so Kenyon, »aber die grundlegenden Voraussetzungen dafür [für ein solches Szenario] sind erfüllt«.

Als Kenyon und Bromley vor über einem Jahrzehnt mit ihren Simulationen begannen, hatte niemand auch nur den kleinsten Hinweis auf Supererden in solchen Entfernungen von einem Stern oder der Sonne gesehen. Das änderte sich, als Mike Brown vom California Institute of Technology gemeinsam mit zwei Kollegen 2003 Sedna entdeckte, das bis dahin wohl seltsamste Objekt im Sonnensystem. Der eisige Himmelskörper ist etwa 1000 Kilometer groß und ähnelt in vielerlei Hinsicht Pluto, Eris und anderen KBOs. Seine Umlaufbahn ist allerdings völlig anders. Sedna kommt der Sonne niemals näher als 76 AE. Das entspricht mehr als dem doppelten Abstand Neptuns von der Sonne. Und während ihres 11 400 Jahre dauernden Umlaufs entfernt sich Sedna bis auf 930 AE von ihr – 31-mal weiter also als Neptun.

Zwar haben auch langperiodische Kometen lang gestreckte Orbits. Deren äußeres Ende ist jedoch fest durch

Himmelskörper im Abseits

Weit außerhalb der Bahnen der acht Planeten, des Asteroidengürtels und selbst des Kuipergürtels haben Astronomen etwa ein Dutzend Objekte mit seltsamen Umlaufbahnen entdeckt. Diese eisigen Himmelskörper bewegen sich alle auf lang gestreckten Ellipsen um die Sonne. Und sie kreuzen die Ebene der Planetenbahnen jeweils genau dann, wenn sie der Sonne am nächsten sind. Wissenschaftler vermuten einen verborgenen »Planet X« weit draußen im Sonnensystem, der mit seiner Schwerkraft das Verhalten dieser kleineren Objekte jenseits des Kuipergürtels synchronisieren könnte.

- Objekte der inneren Oortschen Wolke
- wenig gebundene Objekte
- extrem gestreute KBOs

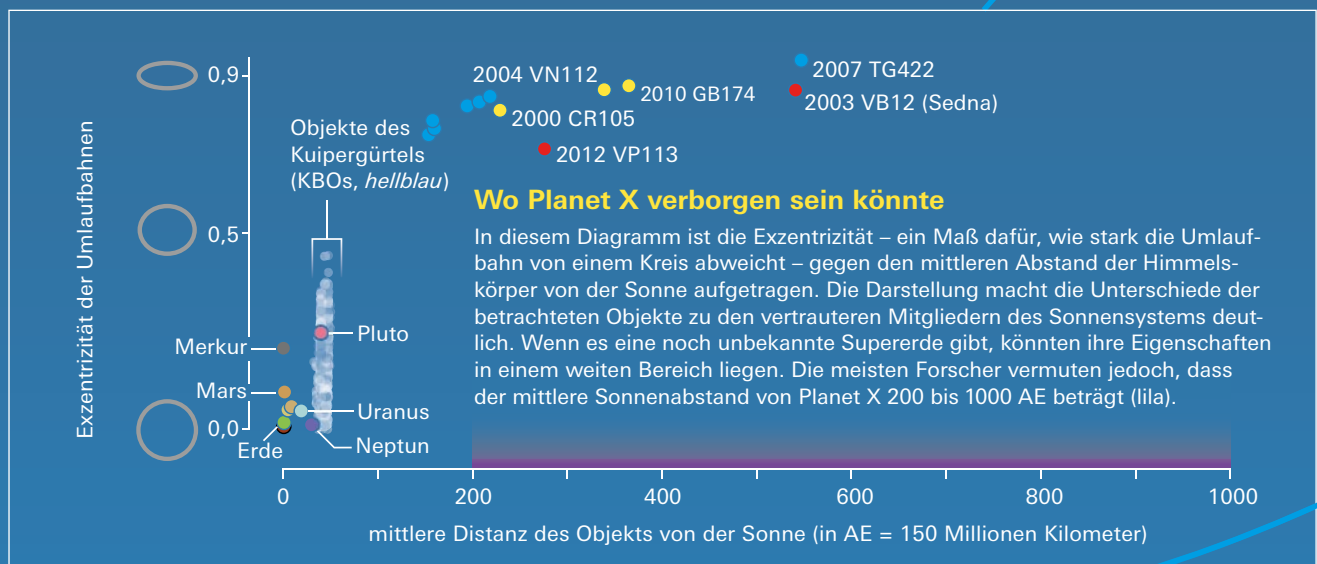
1

Schlüsselerdeckung: Sedna

Die 2003 entdeckte Sedna ist eines der am weitesten entfernten Objekte im Sonnensystem und besitzt vielleicht die seltsamste Umlaufbahn von allen. Der etwa 1000 Kilometer große, vereiste Felsbrocken entfernt sich bis zu 930 Astronomische Einheiten (AE, Abstand Erde–Sonne) von der Sonne und nähert sich dem Zentralgestirn auf seinem 11400 Jahre dauernden Umlauf nur auf 76 AE.

2003 VB12 (Sedna)

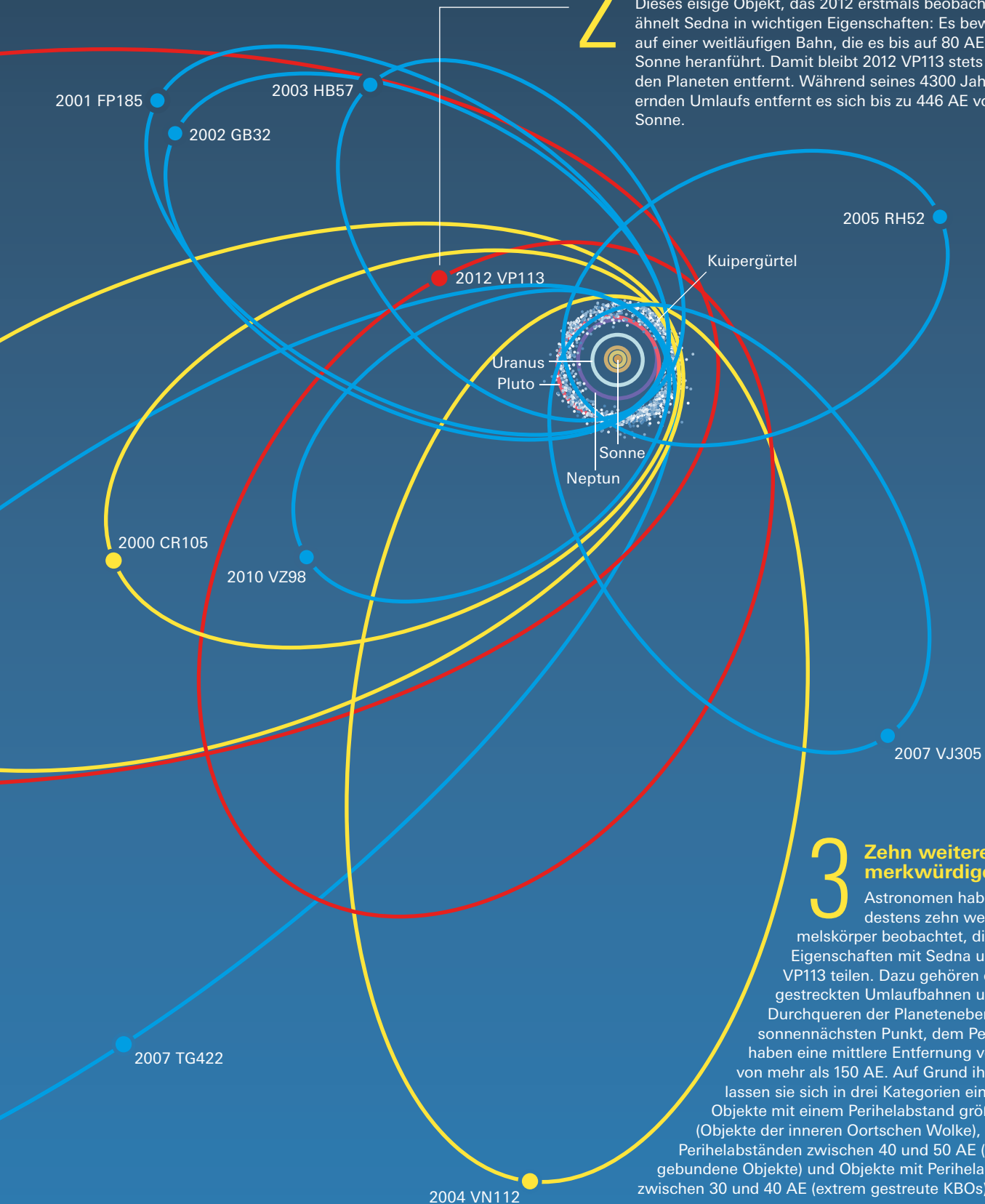
2010 GB174



JAN WILLEM TUIJP: BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; DATEN: KUIPERGÜRTEL-OBJEKTE NACH: INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION (IAU) MINOR PLANET CENTER (MPC); TRANSPARENT-PLANET-OBJEKTE (TPO); DATEN EXTREME-AUSSEIER-OBJEKTE DES SONNENSYSTEMS NACH: SCOTT S. SHEPPARD, CARNegie INSTITUTION FOR SCIENCE

2 Schlüsselentdeckung: 2012 VP113

Dieses eisige Objekt, das 2012 erstmals beobachtet wurde, ähnelt Sedna in wichtigen Eigenschaften: Es bewegt sich auf einer weitläufigen Bahn, die es bis auf 80 AE an die Sonne heranführt. Damit bleibt 2012 VP113 stets weit von den Planeten entfernt. Während seines 4300 Jahre dauernden Umlaufs entfernt es sich bis zu 446 AE von der Sonne.



3 Zehn weitere merkwürdige Extreme

Astronomen haben mindestens zehn weitere Himmelskörper beobachtet, die einige Eigenschaften mit Sedna und 2012 VP113 teilen. Dazu gehören die lang gestreckten Umlaufbahnen und das Durchqueren der Planetenebene an ihrem sonnennächsten Punkt, dem Perihel. Alle haben eine mittlere Entfernung von der Sonne von mehr als 150 AE. Auf Grund ihres Perihels lassen sie sich in drei Kategorien einteilen: Objekte mit einem Perihelabstand größer als 50 AE (Objekte der inneren Oortschen Wolke), Objekte mit Perihelabständen zwischen 40 und 50 AE (wenig gebundene Objekte) und Objekte mit Perihelabständen zwischen 30 und 40 AE (extrem gestreute KBOs).

die Schwerkraft der Riesenplaneten verankert. Sednas Bahn dagegen scheint nirgends verankert zu sein. »Niemand hat erwartet, dass ein solches Objekt existiert, und niemand hat eine Erklärung dafür, wie es dort hingekommen sein könnte«, so Chad Trujillo, einer der Mitentdecker Sednas, der jetzt am Gemini Observatory in Hawaii arbeitet.

Im Lauf der folgenden Jahre stießen Astronomen auf zehn weitere, kleinere Objekte mit derart ausgedehnten Umlaufbahnen. Was die Form der Orbits wie auch die maximalen Entfernungen von der Sonne angeht, waren diese Himmelskörper weniger spektakulär als Sedna. Doch alle besitzen ein ähnliches Argument des Perihels wie sie. Und das erschien den Forschern seltsam.

Noch merkwürdiger wurde die Lage, als Trujillo und Sheppard nach zehnjähriger Suche 2014 im Fachblatt »Nature« die Entdeckung eines weiteren, Sedna ähnelnden, aber halb so großen Himmelskörpers verkündeten.

Das Objekt mit der provisorischen Bezeichnung 2012 VP113 bewegt sich auf einer exzentrischen Bahn mit einer Umlaufzeit von 4300 Jahren. Seine Periheldistanz beträgt 80 AE, sein Aphel (der am weitesten von der Sonne entfernte Punkt) liegt bei 446 AE. Wie Sedna ist 2012 VP113 völlig von Neptuns Schwerkraft entkoppelt. Und – ganz entscheidend – das Argument seines Perihels ähnelt wiederum jenem von Sedna und den anderen ähnlichen Objekten. Dies veranlasste Trujillo und Sheppard, in ihrer Publikation etwas provokant zu schreiben: »Das deutet

nicht veröffentlichten Berechnungen deuten darauf hin, dass diese hypothetischen Planeten mindestens zwei, aber wahrscheinlich weniger als 15 Erdmassen besitzen«, sagt Raúl. Wie Sheppard und Trujillo behaupten auch die Brüder de la Fuente Marcos keineswegs, solide Vorhersagen zu machen. Beide Teams erklären die Existenz einer Supererde lediglich für plausibel.

Es bleiben Zweifel – alternative Erklärungsversuche

Ein verborgener Planet X mag eine verlockende Erklärung für die seltsamen Umlaufbahnen von Sedna und ihren Geschwistern sein. Aber das ist nicht die einzige Option. Möglicherweise, so Planetenforscher Hal Levison vom Southwest Research Institute, seien diese Objekte bereits auf ihre Bahnen geschleudert worden, als die Sonne noch Teil des ursprünglichen Haufens aus Tausenden von Sternen war, die einst aus ein und derselben riesigen Gaswolke entstanden sind. Bevor sich der Cluster auflöste, standen diese Sterne nahe genug beieinander, um die Objekte im äußeren Sonnensystem durch ihre Schwerkraft beeinflussen und sie auf weitläufige Ellipsenbahnen befördern zu können. Als weitere mögliche Erklärung bringt Sheppard galaktische Gezeitenkräfte ins Spiel – die Anziehungskraft in Regionen größerer Materiedichte, an denen das Sonnensystem auf seinem Weg um das Zentrum der Milchstraße vorüberzieht. »Wir haben einige Simulationen dazu durchgeführt«, so der Forscher, »und es ist nichts dabei herausgekommen. Aber es gibt noch viele andere Möglichkeiten.«

Jeder dieser Effekte könnte die Himmelskörper auf lang gestreckte Bahnen gebracht haben. Doch nur eine Supererde würde die beobachtete Ähnlichkeit der Perihel-Argumente produzieren. Es könnte sich dabei aber auch um ein reines Zufallsphänomen handeln. Auf den ersten Blick scheinen die zwölf von Trujillo und Sheppard aufgelisteten Objekte zwar eine ganze Menge zu sein. Bedenkt man jedoch, dass es Millionen von KBOs gibt, »dann ist das statistisch eine vernachlässigbar kleine Anzahl«, so Sheppard.

Die Argumente für einen Planeten X werden noch schwächer, wenn man Schwamb und ihrem Mitarbeiter Ramon Brassler vom Institut für Technologie in Tokio glaubt. »Eine jüngst von uns durchgeführte Untersuchung zeigt, dass es tatsächlich nur vier Objekte gibt, die Sedna ähneln«, so Schwamb. Die restlichen der zwölf merkwürdigen Himmelskörper kommen Neptun zwar ebenfalls nicht allzu nahe, stehen aber trotzdem noch unter dem Einfluss seiner Schwerkraft. Demnach wäre Neptun jener Planet X, der das Perihel-Argument dieser Objekte synchronisiert. »Die übereinstimmende Ausrichtung der vier verbleibenden Objekte«, räumt Brassler ein, »ist nur mit einer Wahrscheinlichkeit von einem Prozent zufälliger Natur.« Letztlich sagt das jedoch nichts aus. »Nur weil ein Planet möglich ist«, betont Schwamb – und der Meinung ist sie ebenfalls –, »muss er nicht tatsächlich existieren.«

Diese Lektion mussten Astronomen mehr als einmal lernen. In den 1980er Jahren etwa behauptete Richard Muller von der University of California in Berkeley, er könne viele erdgeschichtliche Phasen massenhaften Artensterbens



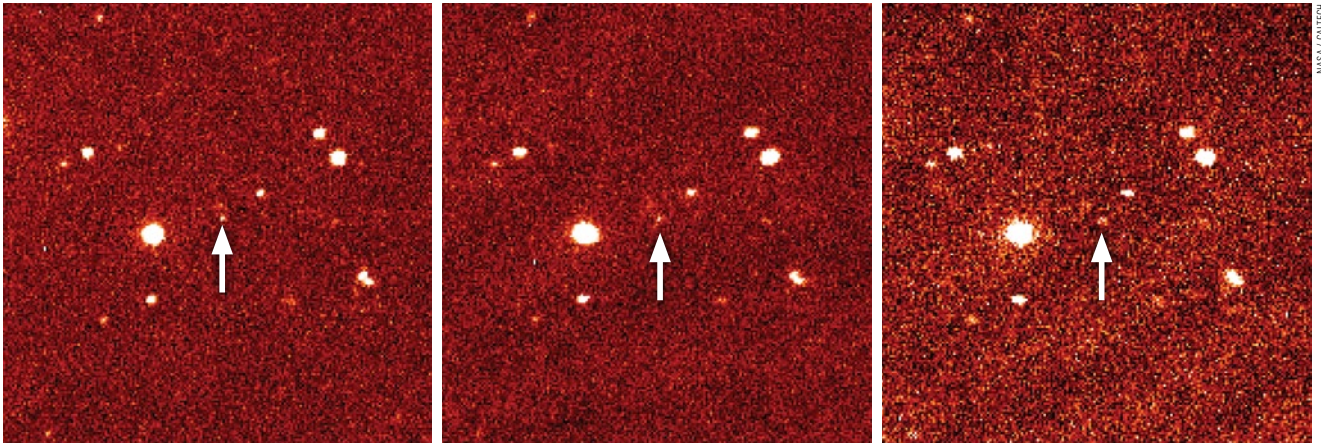
CALTECH, IPAC, ROBERT HURT

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum
Thema Planet X finden Sie unter
spektrum.de/t/planetx

darauf hin, dass ein massereicher, störender Körper im äußeren Sonnensystem existieren könnte.« Vielleicht, so spekulierten die beiden weiter, handle es sich um eine Supererde im Abstand von bis zu 250 AE. Mit ihrer Schwerkraft sollte sie die kleineren Objekte beeinflussen und deren Bahnen synchronisieren. »Ich glaube nicht, dass bis dahin irgendjemand ernsthaft über einen massereichen, unentdeckten Planeten nachgedacht hat«, sagt Meg Schwamb von der Yale University. »Es war der Artikel von Trujillo und Sheppard, der diese [Hypothese] ins Spiel brachte.«

Im September 2014 legten die Brüder Raúl und Carlos de la Fuente Marcos von der Universidad Complutense de Madrid im Fachjournal »Monthly Notices of the Royal Astronomical Society« nach. Ausgehend von den Umlaufbahnen von Sedna, 2012 VP113 und den zehn anderen Objekten zogen sie den Schluss, es gäbe nicht nur eine Supererde. Ihre Analyse liefere »starke Hinweise« auf mindestens zwei weitere Planeten jenseits von Pluto. »Unsere [neuen,] noch



NASA / CALTECH

Diese drei jeweils mit einem Abstand von etwa anderthalb Stunden am Palomar Observatory in Kalifornien gemachten Aufnahmen zeigen die Bewegung von »Sedna«. Die seltsamen Umlaufbahnen dieses Himmelskörpers und ähnlicher Objekte deuten auf die Existenz eines Planeten jenseits der Plutobahn hin.

durch die Existenz eines leuchtschwachen Sterns oder Braunen Zwergs erklären, der die Sonne in einem Abstand von 10 000 AE – das entspricht anderthalb Lichtjahren – umkreist. Alle 26 Millionen Jahre, so seine Theorie, katapultiert dieses Nemesis genannte Objekt ein ganzes Bündel Kometen aus der Oort'schen Wolke – einer immer noch hypothetischen Hülle aus eisigen Körpern, die das Sonnensystem möglicherweise weit jenseits der Sedna-Bahn einhüllt. Die Kometen fallen Richtung Sonne, ein Teil von ihnen kollidiert mit der Erde und löst das Artensterben aus. Zwar war diese Hypothese – ähnlich wie heute jene zu Planet X – einigermaßen plausibel. Doch alle Versuche, Nemesis am Himmel aufzuspüren, verliefen erfolglos.

Hoffnung auf leistungsstärkere Teleskope

In jüngerer Zeit postulierten John Matese und Daniel Whitmire von der University of Louisiana in Lafayette die Existenz eines jupitergroßen Planeten im äußeren Sonnensystem. Dieser sollte einen scheinbaren Überschuss langperiodischer Kometen aus einer bestimmten Richtung am Himmel erklären. Der Widefield Infrared Survey Explorer WISE der NASA fand jedoch keinen Hinweis auf einen solchen Planeten. »Mit WISE könnten wir ein jupitergroßes Objekt bis zu einer Entfernung von 30 000 oder 40 000 AE sehen«, ist sich Kevin Luhman von der Pennsylvania State University sicher, der die Suche mit WISE leitete. »Selbst ein saturngroßes Objekt würden wir bis zu 10 000 oder 15 000 AE von der Sonne entfernt aufspüren.« Planet X wäre zwar viel näher, aber als Supererde auch kleiner und leuchtschwächer und daher mit WISE nicht zu entdecken.

Um eine sichere Aussage darüber zu machen, ob es in unserem Sonnensystem eine Supererde gibt, wäre es also wichtig, weitere Objekte mit ähnlichen Bahneigenschaften wie Sedna zu finden. Deshalb waren die Forscher zunächst so begeistert über die Entdeckung von V774104 im November 2015, dessen Perihel sogar noch weiter von der Sonne entfernt ist als Sednas. Doch bisher sei nicht klar, ob seine

Umlaufbahn für oder gegen einen großen, noch unentdeckten massereichen Planeten spreche, erklärt Sheppard, der das Entdeckungsteam leitete. Auch ist es noch zu früh, um genauere Aussagen über 40 weitere Objekte zu treffen, die Sheppard mit seinem Beobachterteam im Rahmen der nach eigenen Aussagen bisher tiefsten und umfangreichsten Durchmusterung des äußeren Sonnensystems aufgespürt hat. Aber je mehr Objekte die Planetenforscher finden, desto näher kommen sie einer Antwort auf ihre Frage.

Große Hoffnungen setzen sie deshalb in das Large Synoptic Survey Telescope (LSST), das in zwei Jahren im Norden Chiles in Betrieb gehen soll. Es wird zwar nicht größer als die derzeitigen Teleskope sein, aber ein erheblich weiteres Gesichtsfeld besitzen und so den Himmel viel umfassender abschnappen können. Bislang haben die Astronomen gerade einmal zehn Quadratgrad des Himmels nach leuchtschwachen, fernen Himmelskörpern abgesucht, so Trujillo. Zum Vergleich: Der Vollmond überdeckt etwa ein Viertel eines Quadratgrads. Mit dem LSST könnten die Forscher Zehntausende von Quadratgrad durchforsten.

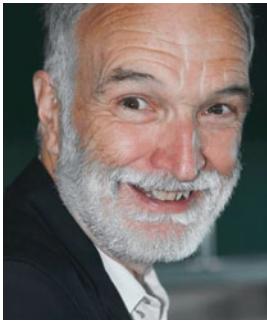
Wenn es da draußen eine Supererde gibt und sie groß und hell genug ist, sollte das LSST sie finden. Es ist aber auch möglich, dass ein Teleskop Planet X bereits im Rahmen eines völlig anderen Projekts erfasst hat. »Vielleicht ist sein Bild irgendwo auf einer Festplatte gespeichert. Und niemand hat es bemerkt, weil niemand danach geschaut hat«, sagt Trujillo. »Menschen neigen dazu, nur das zu sehen, wonach sie suchen.« ◀

QUELLEN

De la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R.: Extreme Trans-Neptunian Objects and the Kozai Mechanism: Signalling the Presence of Trans-Plutonian Planets. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 443, S. 59–63, 2014

Trujillo, C. A., Sheppard, S. S.: A Sedna-Like Body with a Perihelion of 80 Astronomical Units. In: Nature 507, S. 471–474, 2014

SCHLICHTING! DIE MELODIE DES WASSERKOCHENS



Die wechselhaften Geräusche beim langsamen Erhitzen bis zum Sieden verraten viel über die physikalischen Vorgänge im Wasser.

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/1417460

► Eines Morgens wurde mir beim Teezubereiten bewusst, dass ich im Lauf der Zeit eine Art persönliches Verhältnis zum Kessel entwickelt hatte. Der Singsang des heißen Wassers ist mir zu einer lieb gewonnenen Melodie geworden. Sie untermalt die übrigen Frühstücksvorbereitungen und informiert mich nebenbei über den zeitlichen Fortschritt des Kochgeschehens.

Ich kenne mittlerweile mehr intuitiv als bewusst die Noten, bei denen ich die Herdplatte ausschalten muss, um das Wasser mit der Restwärme gerade noch zum Sprudeln zu bringen. Natürlich hängt das auch von der Füllmenge ab – aber selbst beim Eingießen des Leitungswassers habe ich inzwischen gelernt, das in der Tonhöhe anschwellende Füllgeräusch richtig zu interpretieren.

Bereits ein anderer Behälter genügt, um meine intuitiven Fähigkeiten in Frage zu stellen. Daran müsste man sich allerdings genauso gewöhnen können, denn der Grundvorgang ist stets derselbe. Ich habe schließlich begonnen, ihn mit physikalischen Augen zu sehen. Das Verhältnis zwischen meinem Teekessel und mir hat sich seither geändert und wird nie wieder so sein, wie es war.

Die Melodie beim Einfüllen entsteht durch Schwingungen der Luftsäule im Behälter. Dabei werden diejenigen Töne aus dem breiten akustischen Spektrum des Gießgeräuschs verstärkt, die zu den geometrischen Abmessungen passen. Je mehr Luft über der Wasseroberfläche steht, desto tiefer sind die derart angeregten Resonanzen. Der typische Klang wird daher mit abneh-

mender Luftmenge höher und entspricht immer eindeutig einer bestimmten Füllmenge.

Wenn man den Kessel dann auf die Heizfläche stellt, tut sich zumindest akustisch zunächst nicht viel. Man muss sich schon etwas gedulden. Dann aber setzt plötzlich ein breitbandiger Klang ein – eine Vielzahl von Schwingungen, aus der einige charakteristische Töne herausragen und die

Melodie bestimmen. Bei einem Wasserkocher oder Tauchsieder beginnt das viel früher, meist von Anfang an, weil im Unterschied zur Herdplatte der Weg der Wärme wesentlich kürzer ist.

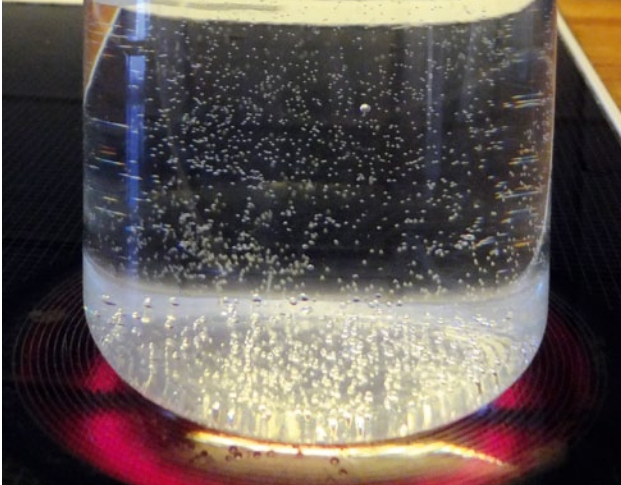
Um dabei zuzuschauen, wie das Geräusch entsteht, habe

ich den Kochvorgang in einem großen Glasgefäß wiederholt (Fotos rechts oben). Auch wenn die Melodie dann etwas anders ist, lassen sich die einzelnen Kochphasen im Kessel und im Glas einander zuordnen. Ab einer Temperatur von etwa 40 Grad Celsius entstehen an den Innenseiten der Wände Blasen, die sich ablösen und lautlos aufsteigen, sobald sie eine bestimmte Größe erreicht haben. Es handelt sich um gelöste Luft, die das Wasser verlässt, weil Erwärmung dessen Aufnahmevermögen für Gase vermindert.

An der Glasoberfläche befinden sich stets leichte Verunreinigungen und kleine Kratzer. An solchen Stellen ist bereits eine winzige Luftmenge gefangen, die nun zunimmt. Denn eine Blase kann sich kaum aus dem Nichts bilden: Da der Druck in ihr umgekehrt proportional zum Radius ist, müsste er beim Entstehen ganz ohne Keim unendlich groß sein. Da lohnt sich die Suche nach Orten, an denen es leichter geht. Dies gilt übrigens auch für die

Das Wasser ist auf Grund vielfältiger Notwendigkeit an den Menschen gebunden, so dass sich seine Einzigartigkeit unter dem Gewohnten verbirgt.

Primo Levi (1919–1987)



H. JOACHIM SCHLICHTING

Ab einer Temperatur von etwa 40 Grad Celsius bilden sich an kleinsten Unebenheiten und anderen Keimen an den Innenwänden eines Gefäßes Luftbläschen, weil Gase in warmem Wasser schlechter löslich sind.



H. JOACHIM SCHLICHTING

In genügend heißem Wasser kann, wie hier, Dampf ungehindert bis zur Oberfläche gelangen. Zuvor sind die oberen Schichten zu kalt dafür: Dorthin aufsteigende Blasen implodieren auf dem Weg und lassen das Gefäß »singen«.

Dampfblasen, die einige Zeit nach der »Entlüftung« des Wassers die akustische Regie übernehmen.

Die am heißen Boden aufkeimenden Gasgebilde bleiben lange klein und unhörbar. Der Grund dafür ist die Konvektion. Denn sobald das Wasser in Bodennähe eine bestimmte Temperatur überschritten hat, steigt es auf und wird durch absinkende kühle Flüssigkeit ersetzt – keine guten Bedingungen für das Blasenwachstum.

Auf der Flucht nach oben kalt erwischt

Zwischen 70 und 80 Grad Celsius setzt dann aber wie aus heiterem Himmel ein durchgängiges Geräusch ein. Das Wasser ist jetzt so heiß, dass die Konvektion es nicht schnell genug durch kälteres Wasser ersetzen kann, bevor lokal Temperaturen von über 100 Grad erreicht werden. Endlich entstehen zahlreiche Dampfblasen, lösen sich bei einer gewissen Größe vom Boden und steigen auf.

Bevor sie jedoch die rettende Oberfläche erreichen, müssen sie durch kühlere Gefilde. Das wird ihnen zum Verhängnis: Der Dampf kondensiert wieder, und die Blasen kollabieren schlagartig zu dem mehr als 1000-mal kleineren Tröpfchen Wasser, das sie einmal waren. Diese als Kavitation bekannte Implosion ist mit einer starken Druckwelle verbunden, die sich als Knall bemerkbar macht und den Wasserkörper zum Mitschwingen anregt (siehe »Lass knacken!«, *Spektrum* März 2014, S. 42), sofern die jeweiligen Tönhöhen zu den geometrischen Abmessungen passen. Die Gesamtheit dieser Miniimplosionen führt zu dem typischen Gesang des heißen Wassers. Er klingt mit zunehmender Temperatur und steigender Menge und Größe der Dampfblasen tiefer. Denn die ausgelösten Druckschwankungen müssen immer mehr Dampf durchqueren und werden dadurch gebremst, was die Schwin-

gungsfrequenz herabsetzt (mehr dazu in »Der Cappuccino-Effekt«, *Spektrum* Juni 2013, S. 54).

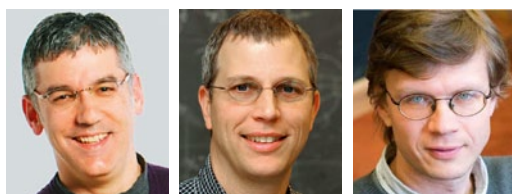
Kurz vor dem Sieden nimmt die Lautstärke des Geräuschs deutlich ab. Jetzt erreichen viele der Blasen die Wasseroberfläche, wodurch die Zahl der Implosionen zurückgeht. Dies ist gewissermaßen die Ruhe vor dem Sturm. Kurz darauf setzt das Plätschern des turbulent brodelnden Wassers ein. Blasen können nun überall im Kesselvolumen entstehen, denn der Dampfdruck, bei dem sich wässrige und flüssige Phase im Gleichgewicht befinden, hat an jeder Stelle den Wert des äußeren Luftdrucks plus des hydrostatischen Drucks der Wassersäule erreicht.

Eine völlig blasenfreie Erwärmung von Teewasser lernte ich bei einem Freund kennen, der es in einer Mikrowelle aufheizte. Die bekannte Kochmelodie blieb aus, und das ganze Spektakel konzentrierte sich vielmehr auf den Moment, als er das Glas der Mikrowelle entnahm und einen Teebeutel hinzugab: Explosionsartig verdampfte ein Teil des Wassers und verspritzte den Rest in der Gegend. Das passiert zuweilen, weil sich das Wasser in der Mikrowelle nicht von unten her, sondern an allen Stellen im Inneren zugleich aufheizt. Dabei gibt es kaum noch Konvektionsbewegungen, und das Wasser kommt nicht mehr hinreichend mit den Keimen in Kontakt. Es überhitzt, erwärmt sich also über 100 Grad Celsius hinaus. Erst der Teebeutel stellt dann plötzlich viele Keime zur Verfügung – die Verdampfung wird auf einen Schlag nachgeholt.

Das ist nicht nur gefährlich, sondern auch wenig unterhaltsam. Da lobe ich mir doch die vertraute Melodie des Wasserkochens, selbst wenn es sich dabei – wie mir nun klar ist – genau genommen um die Todesschreie kollabierender Dampfblasen handelt.

INFORMATIK VERNETZTE QUANTENCOMPUTER

Computer, die sich die exotischen Gesetze der Quantenmechanik zu Nutze machen, sind derzeit noch im Versuchsstadium – als störanfällige Prototypen für einfache Rechenoperationen. Doch nun hoffen die Entwickler, durch Vernetzung vieler derartiger Bausteine dem Ziel näher zu kommen, den ersten echten Quantencomputer zu bauen.



Christopher R. Monroe (links) ist Physikprofessor an der University of Maryland in College Park und Mitglied des dortigen Joint Quantum Institute. Er leistet seit 20 Jahren Pionierarbeit auf dem Gebiet der Quanteninformatik. **Robert J. Schoelkopf** (Mitte) ist Direktor des Yale Quantum Institute an der Yale University in New Haven (Connecticut). Seine Spezialität ist die Entwicklung von Festkörper-Qubits für Quantencomputer. **Mikhail D. Lukin** ist Physikprofessor an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) und Kodirektor am MIT-Harvard Center for Ultracold Atoms. Alle drei Autoren haben eigene Start-up-Firmen mitgegründet.

► spektrum.de/artikel/1420975

Seit 20 Jahren versuchen Laborteams in aller Welt, die seltsamen Gesetze der Mikrowelt für Fortschritte in der Datenverarbeitung zu nutzen. Gemäß der Quantenmechanik sind Elektronen zugleich Teilchen und Wellen, Quantenobjekte können sich an mehreren Orten gleichzeitig aufhalten, und mitunter bleiben zwei Teilchen über große Distanzen so eng miteinander verbunden, als wären sie ein einziges Quantenobjekt. Auf diesen Eigenschaften beruhende Geräte sollten über ungeahnte Fähigkeiten in den Bereichen Informatik und Messtechnik verfügen. Beispielsweise dürften klassische Verschlüsselungen vor solchen Apparaten nicht mehr sicher sein (siehe »Quantencomputer als Kodeknacker«, *Spektrum* August 2016, S. 64).

Andererseits lassen sich damit Daten absolut abhörsicher speichern und übertragen. Quantengeräte könnten zudem komplizierte physikalisch-chemische Prozesse simulieren, die Präzision von Atomuhren steigern und als winzige Sensoren die Eigenschaften biologischer Systeme auf atomarer Ebene messen. Die möglichen Anwendungen reichen von der Materialwissenschaft über die Chemie bis zur Biologie und Medizin.

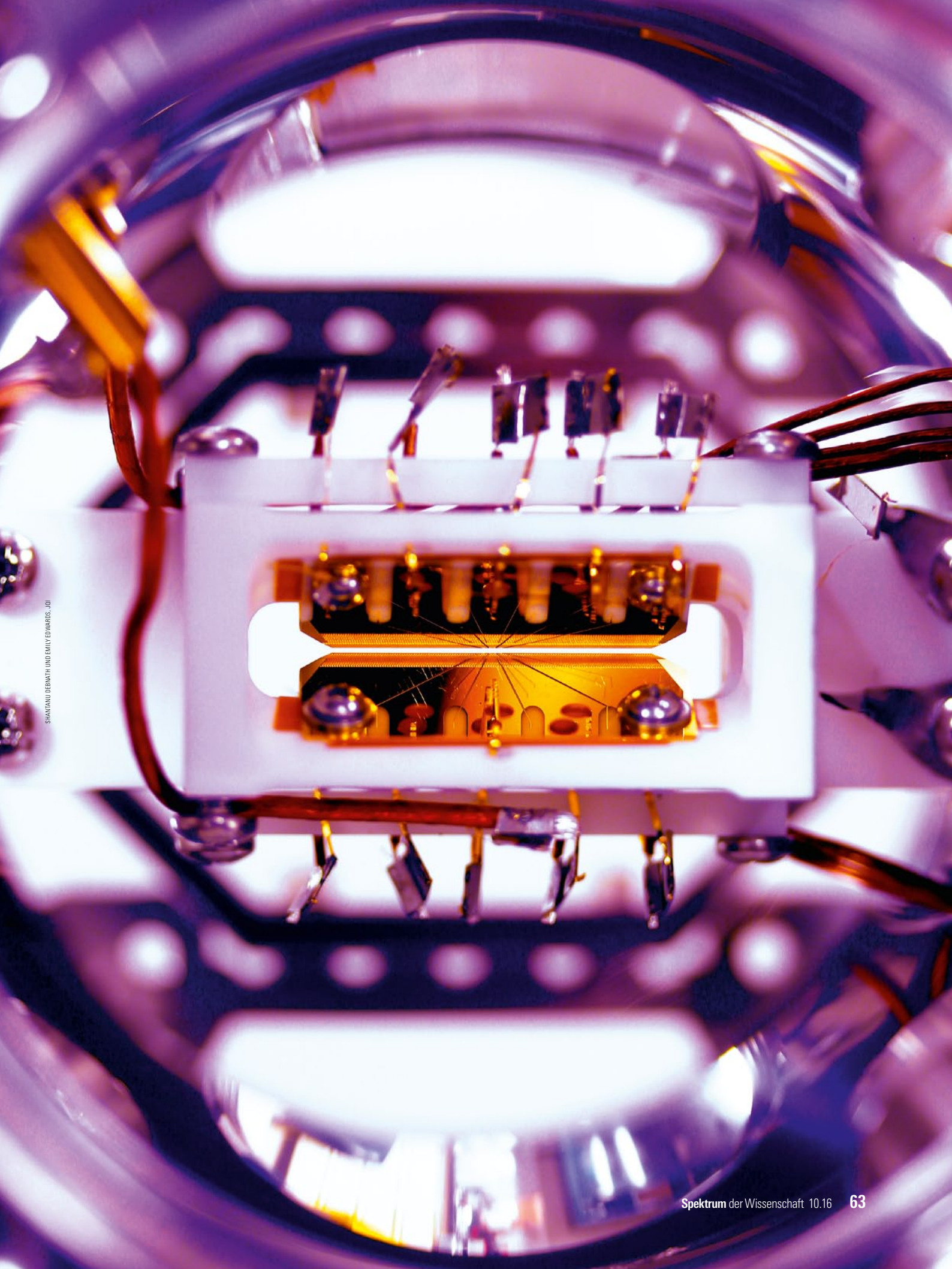
Wegen solch faszinierender Aussichten versuchen die amerikanischen Technikriesen Google und Intel sowie

mehrere Start-up-Unternehmen und Rüstungsbehörden Quantencomputer zu entwickeln. Die universitäre Forschung ist eifrig mit dabei: Allein im Jahr 2015 publizierten drei wichtige Fachzeitschriften mehr als 3000 Artikel zum Thema Quantencomputer oder Quanteninformation.

Allerdings gibt es derzeit noch kein Gerät, das die genannten Versprechen wirklich einlöst. Der Grund ist simpel: Ein Quantencomputer soll einerseits die exotischen Regeln der Mikrowelt ausnutzen, muss aber andererseits für den Einsatz in der Praxis so groß sein, dass die vertrauten Gesetze der Alltagswelt gelten.

Darum wird ein makroskopisches System, das tatsächlich nach Quantenregeln Daten verarbeitet, wahrscheinlich

Kürzlich gelang es dem Team um Christopher R. Monroe, einen der Autoren, fünf geladene Atome in einer Ionenfalle zu einem zwar kleinen, aber programmierbaren Quantencomputer zu verschränken. Die Ionen werden durch Magnetfelder in einem schmalen Spalt (Bildmitte) fixiert und mittels Laserstrahlen manipuliert.



SHANTAU GEBMETH UND EMIL EDWARDS, JQI

einen modularen Ansatz erfordern, bei dem winzige Bauteile so verbunden werden, dass ihre Quanteneigenschaften nicht verloren gehen. An einfachen Beispielen erproben Forscher diese Methode seit Kurzem – mit Erfolg.

Ein Qubit kann simultan in den Zuständen 0 und 1 existieren

Schon Anfang der 1980er Jahre spielten Theoretiker wie Richard Feynman (1918–1988) in den USA und David Deutsch in Großbritannien mit der Idee eines Quantencomputers. 1994 zeigte Peter Shor an den AT&T Bell Laboratories in Murray Hill (New Jersey), dass ein solches Gerät im Prinzip große Zahlen rasend schnell faktorisieren, das heißt in Primzahlen zerlegen kann. Um das Jahr 2000 entstanden die ersten elementaren Prototypen: einfache Systeme mit einigen Bits aus Atomen, Molekülen oder Photonen (Lichtquanten).

Während ein Bit, die Grundeinheit der Information, im klassischen Computer nur entweder den Wert 0 oder 1 einnimmt, kann ein Quantenbit, kurz Qubit, simultan in den Zuständen 0 und 1 existieren. Es kann wahrscheinlich 0 und vielleicht 1 sein oder mit gleicher Wahrscheinlichkeit 0 oder 1 – oder jede andere Wahrscheinlichkeitsverteilung der zwei Binärzustände. Denn Quantenobjekte existieren in der Regel als Superposition (Überlagerung) mehrerer physikalischer Zustände.

Außerdem können Qubits durch die so genannte Verschränkung eng gekoppelt sein: Wird eines von mehreren verschränkten Teilchen beeinflusst, so verändert sich augenblicklich der Zustand aller Partnerteilchen. Das befähigt Quantencomputer zu paralleler Datenverarbeitung in großem Stil. Die zusammenhängenden Superpositionen von Nullen und Einsen erzeugen einen hochkomplexen Bereich möglicher Ergebnisse. Während ein klassischer Computer immer nur einen Rechenschritt nach dem anderen bewältigt, probiert ein Quantencomputer praktisch alle möglichen Lösungen eines Problems auf einmal aus. Ein paar hundert Qubits könnten mehr Ergebnisse ausrechnen, als es Teilchen im Universum gibt.

Bisher sind in vielen Labors nur kleine Quantensysteme aus bis zu zehn Qubits realisiert worden. Mit jedem weiteren Qubit gestaltet es sich schwieriger, das System von der Außenwelt abzuschirmen – und jede Störung beendet die für Quantencomputer wesentliche Verschränkung. Eine Superposition mehrerer Zustände kann nur isoliert existieren. Der Versuch, sie vorzeitig zu beobachten oder zu messen, zwingt das ganze System, nur noch einen einzigen seiner möglichen Zustände einzunehmen. Mit diesem Kollaps der Superposition verlassen die Qubits schlagartig das Regime der Quantenmechanik und werden zu klassischen Bits eines herkömmlichen Computers. Darum treten die speziellen Fähigkeiten von Quantenobjekten normalerweise nur in sehr kleinen Systemen auf und brechen sofort zusammen, wenn sie mit einem größeren Ganzen verbunden werden. Große Systeme sind in der Regel zu komplex und nicht isoliert genug, um sich quantenmechanisch zu verhalten. Schließlich erwarten wir auch nicht, einen Fußball – oder selbst ein mikroskopisch kleines Bakterium – an zwei Orten gleichzeitig zu finden.

Modulare Quantensysteme ähneln Flugstreckennetzen

Wie baut man größere Quantencomputer, ohne ihre typischen Vorteile preiszugeben? Wahrscheinlich genügt es nicht, einfach sukzessive immer mehr Qubits hinzuzufügen. Die kanadische Firma D-Wave Systems hat diesen Weg beschritten und hunderttausende einzelne Qubits zusammengeschaltet. Zwar behaupten Firmenvertreter, ihre Geräte könnten schneller rechnen als klassische Algorithmen, aber uns sind keine veröffentlichten Daten bekannt, die für eine hochgradige Verschränkung oder höhere Rechengeschwindigkeit solcher Systeme sprechen.

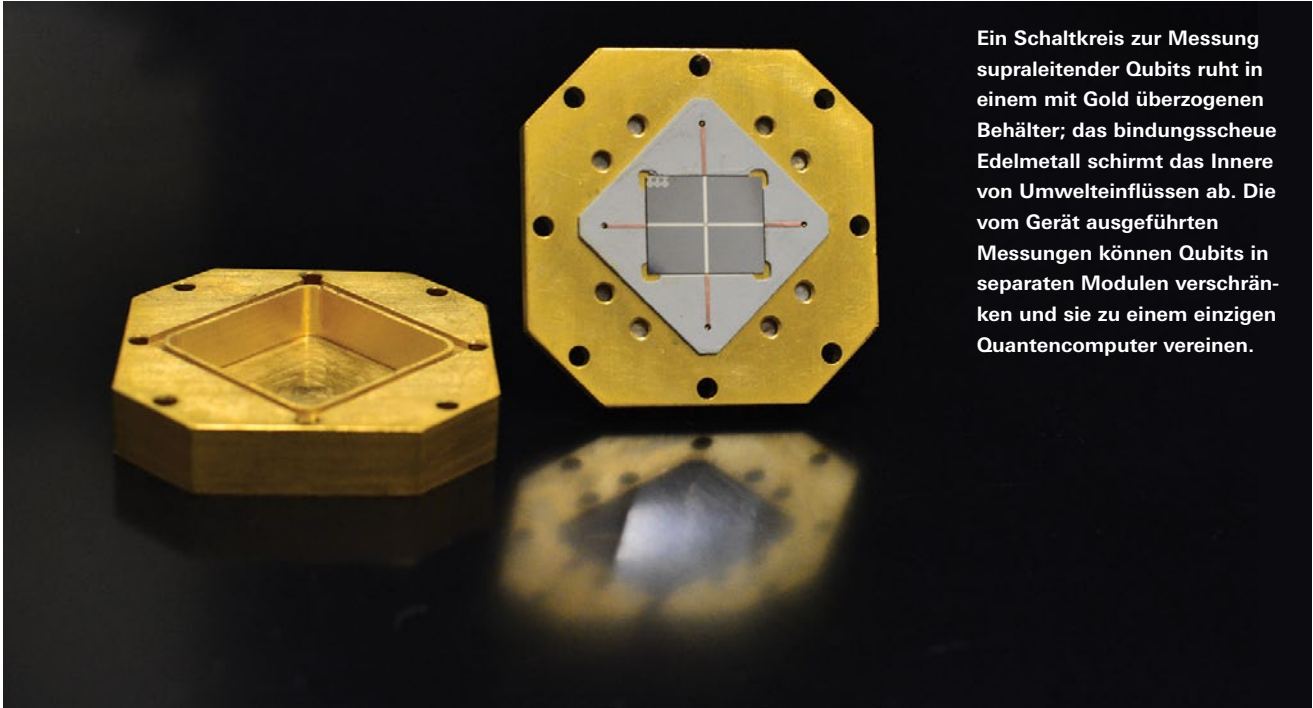
Wir favorisieren stattdessen den modularen Ansatz. Er ähnelt der Strategie, mit der Fluggesellschaften ihr Streckennetz gestalten. Die in Flugzeitschriften abgebildete Streckenübersicht gibt einen groben Eindruck davon, wie das Netzdiagramm eines künftigen Quantencomputers aussehen könnte. Fluglinien verbinden nicht jede Stadt direkt mit jeder anderen; das wäre viel zu aufwändig und zu teuer. Sie verwenden zentrale Knoten oder Drehkreuze, um ein Netzwerk aus indirekten Verbindungen zu schaffen. Mit dem Verzicht auf Direktverbindungen lässt sich ein viel größeres Netz von Zielflughäfen aufbauen und unterhalten.

Ebenso wird auch ein modularer Quantencomputer nicht jedes Qubit einzeln mit jedem anderen verbinden, sondern ein paar Qubits als Knoten nutzen, die zu separaten Modulen führen – so wie die Lufthansa Australien nicht direkt anfliegt, sondern über Drehkreuze in Singapur, Bangkok und Los Angeles.

Modulare Netze begrenzen die Anzahl der Wechselwirkungen zwischen den Qubits und schirmen jedes Modul von äußeren Einflüssen ab. Herkömmliche modulare Systeme, beispielsweise die Mehrkernprozessoren in modernen Computern, verwenden die gleiche Verdrahtung zwischen den Kernen wie innerhalb der Kerne. Hingegen benötigen modulare Quantensysteme zwei oder mehr unterschiedliche Verbindungstypen, um sowohl die Verschränkung als auch die Abschirmung der Module aufrechtzuerhalten. In den

AUF EINEN BLICK MODULARE QUANTENNETZE

- 1 Konstrukteure eines brauchbaren Quantencomputers stehen vor einem Dilemma: Er muss aus vielen Teilchen bestehen, die Quantenregeln gehorchen – doch große Teilchenmengen bilden klassische Objekte.
- 2 Die Lösung liefert der modulare Ansatz: Zahlreiche kleine Quantenprozessoren werden so miteinander vernetzt, dass ihre Quantennatur nicht verloren geht.
- 3 Mehrere modulare Methoden, die auf unterschiedlichen Typen von Quantenbits beruhen, haben sich bereits in Labortests mit wenigen Modulen als erfolgreich erwiesen.



Ein Schaltkreis zur Messung supraleitender Qubits ruht in einem mit Gold überzogenen Behälter; das bindungsscheue Edelmetall schirmt das Innere von Umwelteinflüssen ab. Die vom Gerät ausgeführten Messungen können Qubits in separaten Modulen verschränken und sie zu einem einzigen Quantencomputer vereinen.

2000er Jahren haben sich drei modulare Strategien herausgeschält, die auf unterschiedlichen Qubit-Typen beruhen. Wir drei entwickeln diese Ansätze unabhängig voneinander und glauben, dass sie den Weg zu größeren Quantencomputern ebnet.

Größere Systeme aus atomaren Qubits

Das natürlichste Qubit ist ein einzelnes Atom, dessen aus Kern- und Elektronenspins zusammengesetzte Energiezustände Quanteninformation speichern. Aus atomaren Qubits lassen sich grundsätzlich größere Systeme bilden, denn mehrere Atome desselben Typs sind praktisch identisch und müssen nicht eigens vereinheitlicht werden. Laserstrahlen kühlen die Atome, indem sie deren Bewegungsenergie auf gestreutes Laserlicht übertragen und sie so fast zum Stillstand bringen. Dabei schweben die Atome in einer Vakuumkammer, damit sie nicht mit der Umgebung wechselwirken.

Neben elektrisch neutralen Atomen können auch Ionen, das heißt geladene Atome als Qubits dienen. Neutrale Atome lassen sich mit einem »optischen Gitter« aus kreuzweise angeordneten Laserstrahlen einfangen. Viele Forschergruppen bevorzugen aber positiv geladene Ionen – Atome, denen ein Hüllenelektron fehlt. Diese stoßen sich gegenseitig stark ab und müssen durch äußere elektromagnetische Felder in einer so genannten Ionenfalle fixiert werden. Man kann auf diese Weise Hunderte von lasergekühlten Ionen zu einem stationären Kristall vereinen, dessen einzelne Teilchen sich wie identische, durch elastische Federn verbundene Pendel verhalten. Zusätzliche Steuerungslaser stoßen die Ionen so an, dass deren Spinzustände durch die Ionenschwingungen miteinander verschränkt werden; die Methode schlugen Ignacio Cirac und Peter Zoller erstmals 1995 an der Universität Innsbruck in Österreich vor. In den vergangenen Jahrzehnten haben

Forscher damit erstaunliche Fortschritte beim Verschränken einzelner Qubits aus fixierten Ionen gemacht. Derzeit beherrschen Teams, die einer von uns (Monroe) sowie David J. Wineland vom National Institute of Standards and Technology (NIST) in Gaithersburg (Maryland) und Rainer Blatt von der Universität Innsbruck leiten, die perfekte Verschränkung von bis zu 20 Qubits aus eingefangenen Ionen.

Forscher haben zwei Methoden erprobt, um Module aus verschränkten Ionenkristallen zu verbinden. Bei der einen werden einige Ionen-Qubits zwischen zwei Modulen verschoben und dabei durch ein komplexes Labyrinth aus Elektroden geführt; dieses Verfahren entwickelte Monroe im Jahr 2000 zusammen mit Wineland und David Kielpinski am NIST. Günstigenfalls surfen die Ionen auf einer Welle aus elektrischen Feldern dahin, ohne ihren Qubit-Zustand zu verändern. Sobald die Ionen beim zweiten Modul ankommen, bringen Laserpulse sie dazu, neue Verschränkungen zu bilden. Wenn die beiden Module beispielsweise je 50 Qubits enthalten, entsteht daraus eine einzige, schwach verschränkte Gruppe von 100 Qubits. Theoretisch vermag diese Ionen-Transfermethode beliebig viele Module zu koppeln.

Allerdings ist es schwierig, die komplizierten Ionenfallen aus Hunderten oder Tausenden exakt positionierter Elektroden so zu steuern, dass die Ionen-Transfers gelingen. Wir müssen sämtliche Elektrodenspannungen geschickt manipulieren, damit die Ionen durch das Elektrodenlabyrinth surfen. In den USA fabrizieren die militärischen Sandia National Laboratories in Albuquerque (New Mexiko) und der Konzern Honeywell International in Morristown (New Jersey) Elektroden für Ionenfallen aus Silizium und anderen Halbleitern.

Bei der zweiten Methode zur Verbindung von Ionen-Qubit-Modulen werden die Ionen nicht verschoben, sondern Laser veranlassen die Ionen, Photonen auszusenden, die mit den Ionen verschränkt sind. Die Photonen bewerkstelligen

Die drei Typen von Quantencomputern im Überblick

Computer, welche die Gesetze der Quantenmechanik nutzen, können im Prinzip Berechnungen ausführen, an denen klassische Computer scheitern. Doch mit wachsender Größe des Geräts wird es immer schwieriger, die Quanteneigenschaften zu bewahren. Darum verfolgen Forscher eine modulare Strategie: Sie bauen zahlreiche kleine Quantencomputer und vernetzen sie zu einem größeren Ganzen. Wir stellen drei einfache modulare Netze vor, die auf unterschiedlichen Typen von Quantenbits (Qubits) beruhen.

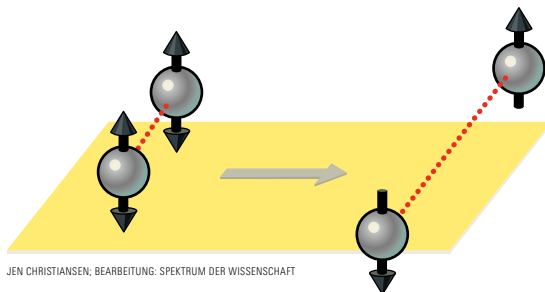
Quanteneigenschaft 1: Superposition

Atome und subatomare Teilchen können gleichzeitig mehrere Zustände einnehmen; sie bilden eine so genannte Superposition der Zustände. Während ein klassisches Objekt nur in einem einzigen Drehsinn zu rotieren vermag, können Quantenteilchen zwei Spinzustände zugleich aufweisen – Spin aufwärts und Spin abwärts. Auf Grund dieser Eigenschaft probieren Quantencomputer viele mögliche Lösungen eines Problems auf einmal aus.



Quanteneigenschaft 2: Verschränkung

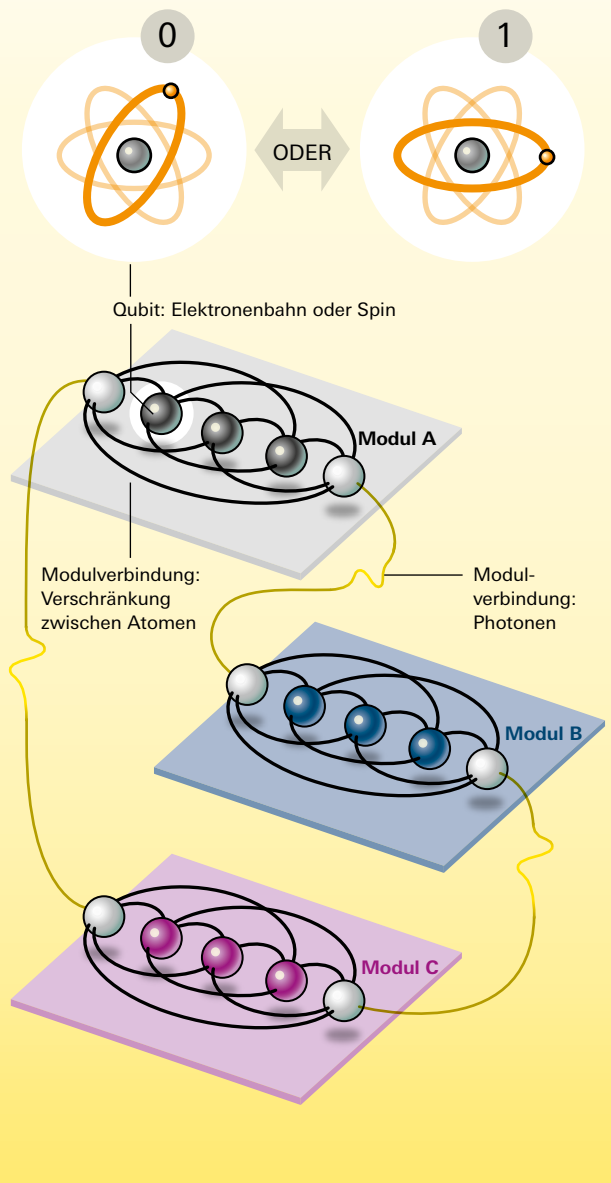
Zwei Teilchen können einen zusammenhängenden Quantenzustand bilden, so dass die Beeinflussung des einen Teilchens augenblicklich das andere verändert – sogar über große Entfernungen hinweg. Im Bild unten bilden die verschränkten Teilchen anfangs eine Superposition von Spin-aufwärts- und Spin-abwärts-Zuständen, die in der Summe Spin null ergeben. Wenn eine äußere Messung das eine Teilchen zwingt, den eindeutigen Zustand Spin abwärts einzunehmen, nimmt das andere Teilchen sofort Spin aufwärts ein, wodurch der Gesamtspin null erhalten bleibt. Sind mehrere Quantenbits verschränkt, so verändert die Beeinflussung eines Qubits augenblicklich alle anderen; das eröffnet ungeahnte Möglichkeiten paralleler Datenverarbeitung.



JEN CHRISTIANSEN; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

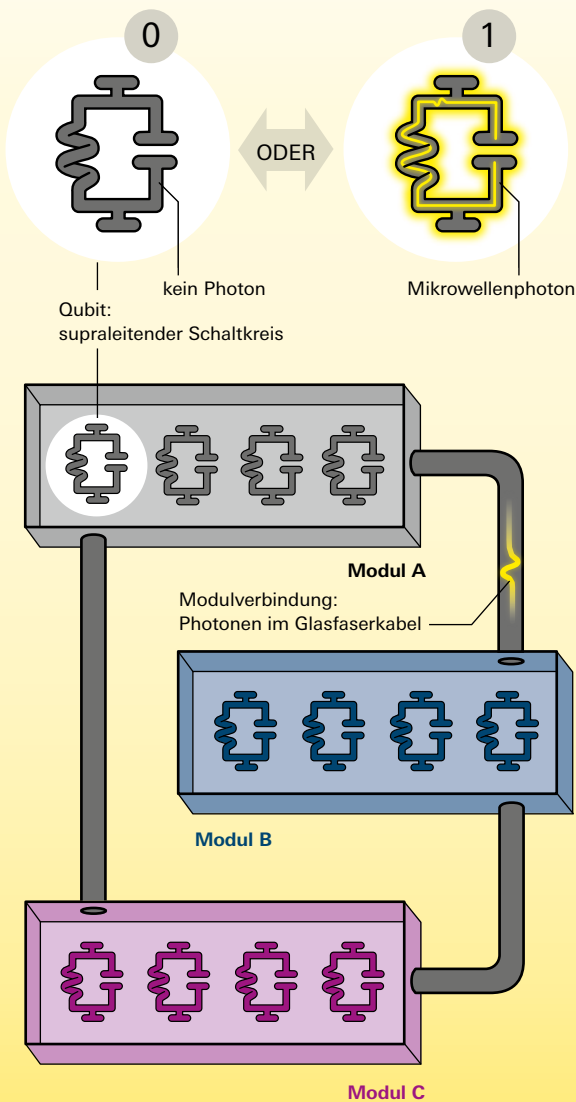
1 Atomare Qubits

Am einfachsten lässt sich ein modularer Quantencomputer mit einzelnen Atomen oder Ionen als Qubits realisieren. Jedes Atom stellt durch unterschiedliche Elektronenbahnen eine Superposition der binären Werte 0 oder 1 dar. Unten sind schematisch drei Module aus je fünf Atomen dargestellt, die so verbunden sind, dass die Quanteneigenschaften jedes Moduls erhalten bleiben. Zwei spezielle Atome an den Modulrändern (weiß) können Photonen aussenden, um mit anderen Modulen zu kommunizieren.



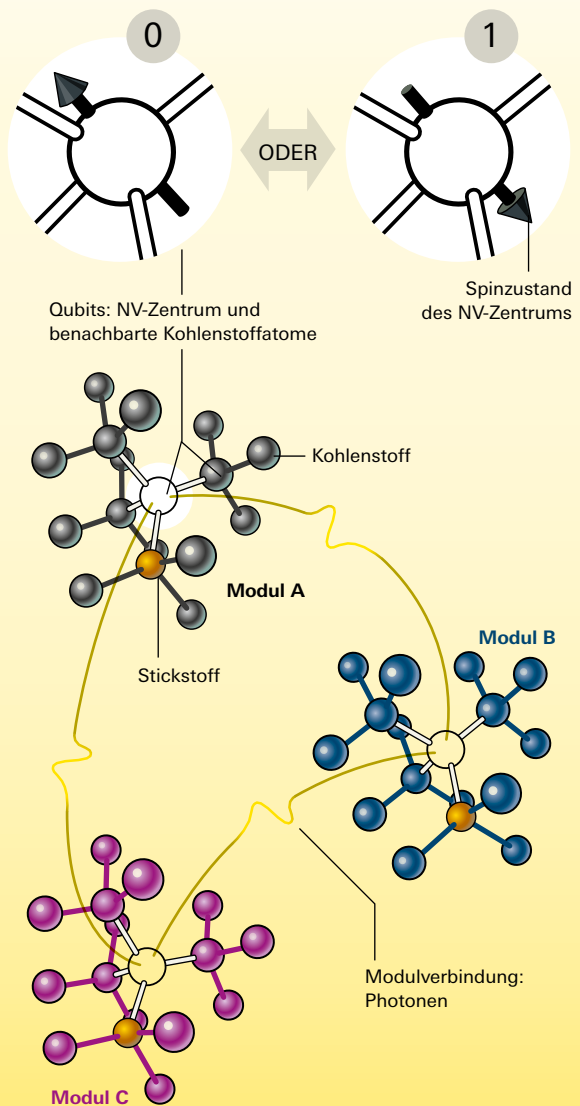
2 Supraleitende Qubits

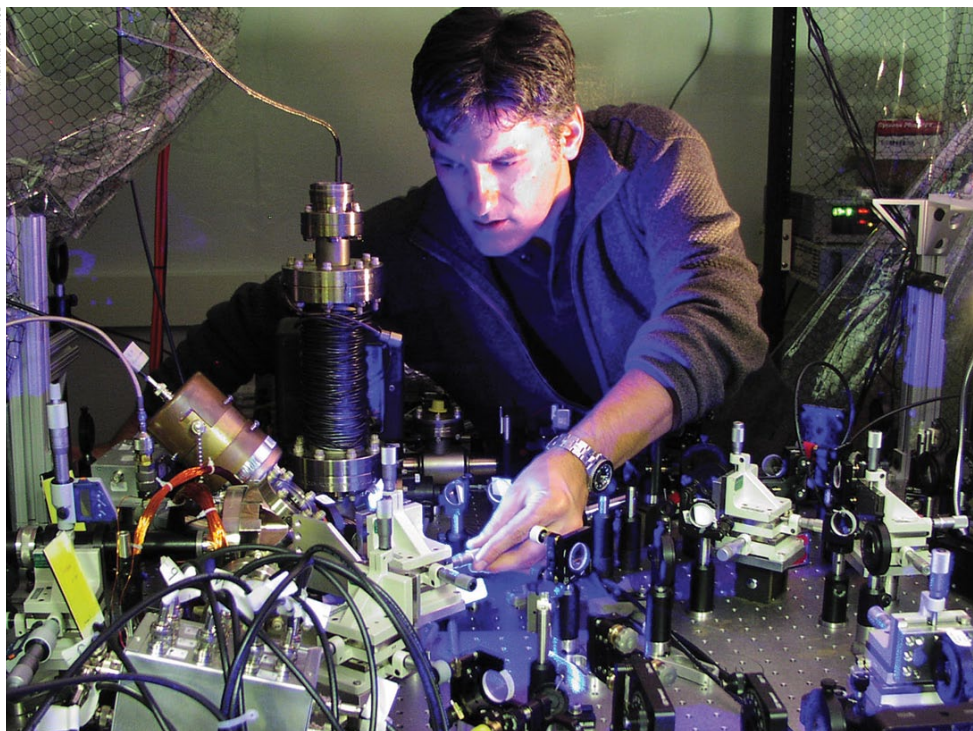
Auch »künstliche Atome« aus supraleitenden Schaltkreisen können als Qubits dienen. Diese Qubit-Schaltkreise nehmen die Werte 0 oder 1 an – je nachdem, ob ein Mikrowellenphoton vorhanden ist beziehungsweise ob ein Wechselstrom durch den Schaltkreis fließt. Innerhalb jedes Moduls sind die Qubits über gefangene Photonen direkt miteinander verschränkt. Diese Photonen können auch durch Kabel gesendet werden, um jedes Modul mit den anderen zu verschränken.



3 Spin-Qubits in Festkörpern

Eine dritte Möglichkeit ist, die Defekte in einem Kristallgitter für Qubits zu nutzen. Sitzt im Diamantgitter ein Stickstoffatom an Stelle eines Kohlenstoffatoms und bleibt ein benachbarter Gitterplatz leer, so spricht man von einem Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum oder NV-Zentrum (englisch: nitrogen-vacancy). Das NV-Zentrum und alle benachbarten Kohlenstoffatome dienen als Qubits, und ihre Spinzustände repräsentieren Nullen und Einsen. Jeder Defekt-Cluster im Gitter bildet ein separates Modul; verschränkte Photonen verbinden die Module miteinander wie im ersten Typ.





Christopher R. Monroe manipuliert atomare Qubits mit Laserstrahlen. Die Ionen sind durch elektromagnetische Felder, die von äußeren Elektroden erzeugt werden, in einer Ionenfalle eingeschlossen.

dann die Verschränkung zwischen den Modulen. Die photonische Quantenverbindung beruht auf Ideen, die Forscher an der Universität Innsbruck, am California Institute of Technology in Pasadena und an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) vor 20 Jahren entwickelten und die Monroe vor zehn Jahren in die Praxis umsetzte.

Die photonische Verbindungstechnik hat große Vorteile: Wir können damit Qubit-Speicher über große Entfernungen koppeln, und sie ist nicht nur bei Ionen-Qubits, sondern auch bei neutralen Atomen anwendbar. Außerdem können wir die photonische Verbindung zwischen Modulen durch Glasfasernetze und Schalter leiten und auf diese Weise steuern, welche Qubits verschränkt werden. Freilich hat die Methode einen Nachteil: Die Verbindung zwischen Qubits und Photonen ist nicht sehr zuverlässig, denn man muss die Photonen auffangen und ans Ziel leiten. Oft sind viele Versuche nötig, bis eine erfolgreiche Verbindung steht. Derzeit gelingen höchstens zehn verschränkte Verbindungen pro Sekunde.

An Stelle natürlicher Atome lassen sich auch »künstliche Atome« in supraleitenden Schaltkreisen als Qubits nutzen. Obwohl solche Geräte aus vielen Atomen bestehen, können sie sich als einfache, kontrollierbare Qubits verhalten: Die An- oder Abwesenheit eines einzelnen von außen eingespeisten Mikrowellenphotons oder die Drehrichtung eines im Schaltkreis zirkulierenden Stroms im oder entgegen dem Uhrzeigersinn bedeutet den Zustand 0 oder 1. Quantenschaltkreise mit den gewünschten Eigenschaften können wie herkömmliche Chips in Serie gefertigt werden. Bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt sind Supraleiter-Qubits besonders robust: In den vergangenen 15 Jahren hat die Lebensdauer solcher Systeme millionenfach zugenommen.

Nun machen Supraleitende Quantenschaltkreise massive Fortschritte in Richtung Quantencomputer. In Universitätslabors und bei Konzernen wie Google und IBM werden derzeit bereits mehrere Supraleiter-Qubits gleichzeitig manipuliert und verschränkt. Mit der so genannten Schaltkreis-Quantenelektrodynamik, die einer von uns (Schoelkopf) zusammen mit Michel H. Devoret und Steven M. Girvin an der Yale University in New Haven (Connecticut) entwickelt hat, können mehrere Qubits über große Entfernungen durch supraleitende Übertragungswege verschränkt werden.

Supraleitende Module und Spin-Qubits in Festkörpern

Supraleitende Geräte eignen sich besonders gut für einen modularen Aufbau. Wir verbinden die Module innerhalb eines großen Kühlgeräts mit supraleitenden Drähten und Messgeräten; zugleich schirmen wir sie voneinander ab, damit sie einander nicht stören. Um die Module zu verschränken, haben Forscher an der Yale University, an der University of Colorado in Boulder und an der University of California in Berkeley spezielle supraleitende Quantenmessgeräte entwickelt.

Der modulare Ansatz mit supraleitenden Qubits hat mehrere Vorteile. Statt einen großen, komplizierten Schaltkreis zu bauen und zu testen, stellen wir kleine Module in Serie her und vernetzen sie nachträglich schrittweise. Wir können defekte Module entfernen oder überbrücken und die Modulverbindungen abändern, um unterschiedliche Strukturen zu erzeugen. Außerdem sind Quantengeräte zur Umwandlung von Mikrowellen- in optische Daten in Entwicklung, welche Module per Glasfaser koppeln und letztlich weiträumige Quantencomputernetze schaffen.

Ein dritter Typ von Qubits kodiert die Daten als Spin-zustände in Festkörpern. Einer von uns (Lukin) sowie zahl-

reiche andere Teams verwenden Kristalldefekte, um Qubits zu erzeugen. In einem Diamantgitter aus Kohlenstoffatomen ist gelegentlich ein einzelnes Atom durch Stickstoff ersetzt, und eine benachbarte Gitterstelle bleibt leer; dieser Defekt heißt Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum oder kurz NV-Zentrum (englisch: nitrogen-vacancy center). Elektromagnetische Pulse können den Elektronenspin dieser atomähnlichen Verunreinigung steuern. Bei einer von Lukin entdeckten Methode reagiert das NV-Zentrum auf die Kernspins der nächsten Kohlenstoffnachbarn und erzeugt durch deren magnetische Wechselwirkungen einen Cluster eng benachbarter Qubits.

Gleichwohl hat ein NV-Defekt nur wenige direkte Nachbarn; das begrenzt die Anzahl der Qubits pro Modul auf weniger als ein Dutzend. Größere Strukturen erfordern daher das Vernetzen vieler NV-Module. Qubits, die in separaten Kristallgittern liegen, lassen sich koppeln, indem man jedes Qubit zwingt, ein Photon auszusenden, und dann die Photonen misst. Liegen mehrere NV-Defekte in einem einzigen Diamantgitter, können wir Phononen – gequantelte Gitterschwingungen – nutzen, um Quantendaten zwischen den Defekten auszutauschen.

Zwar ist es schwierig, die in solchen NV-Qubits kodierten Daten zu verarbeiten, doch wenigstens braucht man dafür keine aufwändige Tiefkühlung wie bei den Supraleiter-Qubits. Jörg Wrachtrup an der Universität Stuttgart und Fedor Jelezko an der Universität Ulm haben Verfahren entwickelt, wie man einzelne NV-Zentren beobachten und mit Elektronenspin-Qubits arbeiten kann. Ein Team um David Awschalom von der University of Chicago manipuliert diese Qubits binnen Nanosekunden und kommt damit an das Schalttempo eines modernen klassischen Prozessors heran.

Ende 2015 koppelten Ronald Hanson und seine Kollegen an der Technischen Universität Delft (Niederlande) einzelne NV-Qubits über mehr als einen Kilometer hinweg mittels verschränkter Photonen, ganz ähnlich wie bei der oben beschriebenen photonischen Verbindung von Ionen. Derzeit ist die Methode nicht sehr effizient: Beim Delfter Experiment kommen die Verschränkungsverbindungen nur einige Male pro Stunde zu Stande. Doch neue Verfahren mit winzigen optischen Geräten im Nanometerbereich, die an der Harvard University und am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge entwickelt werden, versprechen bessere Kopplungswerte. Da wir bereits mehrere Qubits um einen einzelnen Kristallgitterdefekt erzeugen und länger als eine Sekunde in ultrareinen Kristallen speichern können, wecken NV-Zentren große Hoffnungen auf den Bau eines echten modularen Quantencomputers.

Was werden Quantengeräte eines Tages leisten?

In mehr als 20 Jahren Forschung und Entwicklung haben Forscher modulare Ansätze in kleinem Maßstab erprobt. Nun gilt es, die Methoden auf größere Ansammlungen von Qubits und Modulen auszuweiten und nach sinnvollen Anwendungen zu suchen.

Bei größeren Quantenmaschinen wird es schwierig, das Gesamtsystem zu steuern und nachzuweisen, dass es sich wirklich quantenmechanisch verhält. Glücklicherweise

erlaubt uns die modulare Architektur, einzelne Komponenten und ihre Verbindungen separat zu testen, ohne das ganze System zu stören.

Relativ einfache modulare Geräte könnten ein »Quanteninternet« bilden, das aus kleinen, durch verschränkte Photonen verbundenen Quantenprozessoren besteht. Sie würden zudem als Signalverstärker dienen und die Reichweite der Quantenkommunikation, die derzeit durch Photonenverluste in herkömmlichen Glasfasern auf rund 100 Kilometer begrenzt ist, über Kontinente hinweg ausdehnen.

Quantenmodule aus Atomen und Ionen werden künftig in Atomuhren – den exaktesten Zeitmessgeräten – eine entscheidende Rolle spielen. Ein globales Netzwerk solcher Uhren könnte als »Weltuhr« ungeahnt verlässlich und genau die internationale Normalzeit angeben.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



Ein kleines Quantennetz kann als Präzisionssensor im Nanometerbereich für elektromagnetische Felder und Temperaturen in komplexen chemischen und biologischen Systemen fungieren. Zum Beispiel haben Forscher mit Hilfe der Elektronen- und Kernspins von Kristalldefekten bereits Magnetresonanzbilder mit atomarer Auflösung hergestellt. Da diese Technik einzelne Moleküle abzubilden vermag, könnte sie der biologischen und materialwissenschaftlichen Grundlagenforschung nutzen sowie neue Werkzeuge für medizinische Diagnostik und Pharmazie bereitstellen.

Zwar wissen wir noch nicht, ob sich Quantencomputer wirklich als Stand der Technik etablieren werden. Aber mit der Entwicklung modularer Quantennetze sollten wir bald die Antwort auf diese Frage finden. ◀

QUELLEN

- Childress, L. et al.:** Atom-Like Crystal Defects: From Quantum Computers to Biological Sensors. In: *Physics Today* 67, S. 38–43, 2014
- Debnath, S. et al.:** Demonstration of a Small Programmable Quantum Computer with Atomic Qubits. In: *Nature* 536, S. 63–66, 2016
- Devoret, M. H., Schoelkopf, R. J.:** Superconducting Circuits for Quantum Information: An Outlook. In: *Science* 339, S. 1169–1174, 2013

LITERATURTIPPS

- Awschalom, D. D. et al.:** Spintronik mit Diamant. In: *Spektrum der Wissenschaft* 12/2007, S. 112–120
Ausführliche Beschreibung der Festkörper-Qubits als Fehlstellen im Kristallgitter
- Monroe, C. R., Wineland, D. J.:** Quantencomputer mit Ionen. In: *Spektrum der Wissenschaft* 6/2009, S. 34–41
So funktionieren atomare Ionen-Qubits in Ionenfallen.

FERTIGUNGSTECHNIK PRÄGEN IM NANOFORMAT

Die Industrie benötigt immer filigranere Bauteile im Nanomaßstab. Spezielle Stempelverfahren gestatten es, diese kostengünstig herzustellen.



Jaslyn B. K. Law ist Dozentin an der technischen Hochschule Ngee Ann Polytechnic in Singapur und entwickelt Methoden zur hochpräzisen industriellen Bearbeitung von Oberflächen. Auf diesem Gebiet hält sie bereits mehrere Patente.

► spektrum.de/artikel/1420978

Unter den Nanotechnologieexperten herrscht heute eine Aufbruchsstimmung, die am ehesten mit der Computerrevolution in den 1970er Jahren zu vergleichen ist. In Längenbereichen von weniger als etwa 100 Nanometern – tausendmal kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haars – verhalten sich Materialien vollkommen anders als bei großen Skalen gewohnt. Die dabei entdeckten Phänomene führen zu rasanten Fortschritten in ganz unterschiedlichen Feldern: von kompakter und effizienter Elektronik über Oberflächen mit maßgefertigten

physikalischen Eigenschaften bis hin zu neuartigen Medizinprodukten.

Klassische industrielle Herstellungsmethoden sind bei diesen Größenskalen jedoch nicht präzise genug. Genaueste nanotechnologische Bearbeitung wiederum braucht komplizierte und teure Apparaturen sowie aufwändige Arbeitsschritte. Ingenieure suchen daher nach den besten Wegen, um günstig und schnell große Mengen mikroskopisch kleiner Bauteile zu fertigen.

Die verschiedenen Techniken zur Herstellung von Nanostrukturen, die in den letzten Jahrzehnten aufkamen, lassen sich in zwei grundlegende Kategorien einteilen: Top-down und Bottom-up. Erstere Methode ist vergleichbar mit dem Herausarbeiten einer Skulptur aus einem Steinblock, wobei man von einem Rohling überflüssiges Material entfernt. Bottom-up-Nanofabrikation ähnelt dagegen dem Errichten eines Hauses aus Ziegeln, bei dem die gewünschte Struktur Stück für Stück entsteht.

Für eine industrielle Großproduktion muss ein Verfahren zuverlässig, an wechselnde Anforderungen anpassbar und rentabel sein. Bottom-up-Ansätze erfüllen noch nicht alle dieser Kriterien; beispielsweise gibt es Probleme, die einzelnen Bausteine bei den verschiedenen Arbeitsschritten exakt zu positionieren. Das macht die Methode weniger flexibel und die Ergebnisse schlechter reproduzierbar. Demgegenüber gibt es zwei Top-down-Vorgänge, die bereits erfolgreich sind. Einer davon ist die Fotolithografie – das Standardverfahren für Computerchips. Die andere Technik heißt Nanoprägelithografie. Sie verformt Materialien mechanisch und wird inzwischen immer öfter eingesetzt.

Die Fotolithografie oder optische Lithografie stammt aus den 1960er Jahren und ist heute der führende Herstellungsprozess in der Halbleiterindustrie. Dabei überträgt ein op-

AUF EINEN BLICK VOM NISCHENDASEIN ZUR FLIESSBANDPRODUKTION

- 1** Auf wenige Nanometer genau geformte Materialien sind wegen ihrer besonderen Eigenschaften in der Industrie gefragt, etwa für Elektronik und kompakte Optiken.
- 2** Bewährte Herstellungsmethoden aus der Halbleiterindustrie stoßen jedoch allmählich an Auflösungsgrenzen, sind sehr teuer und lassen sich bei unebenen oder flexiblen Substraten oft gar nicht anwenden.
- 3** Ein alternativer Ansatz ist die so genannte Nanoprägelithografie. Sie ermöglicht die Serienfertigung verschiedenster exakt strukturierter Oberflächen. Damit zieht die Nanotechnologie in viele neue kommerzielle Anwendungen ein.

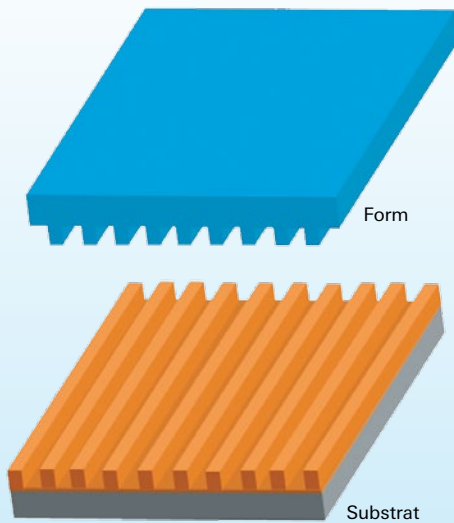


Die Nanoprägelithografie kann auf flexible, transparente Kunststoffe Strukturen für beliebige lichtbrechende Eigenschaften übertragen. Die Oberflächen werden etwa antireflektierend oder, wie in diesem Beispiel, zu einem optischen Interferenzgitter.

Drei Varianten der Nanoprägelithografie

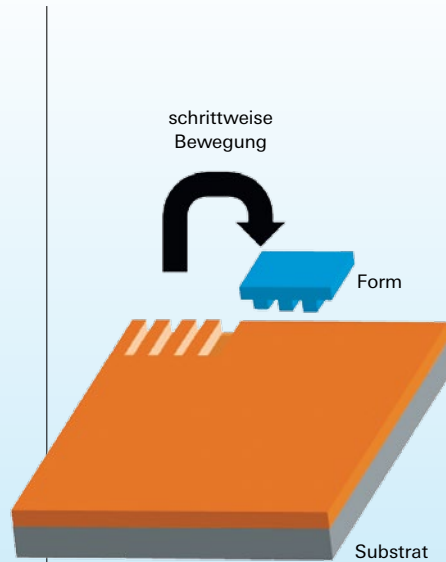
1 Einfachprägung

Die Form und das Substrat haben dieselben Abmessungen.



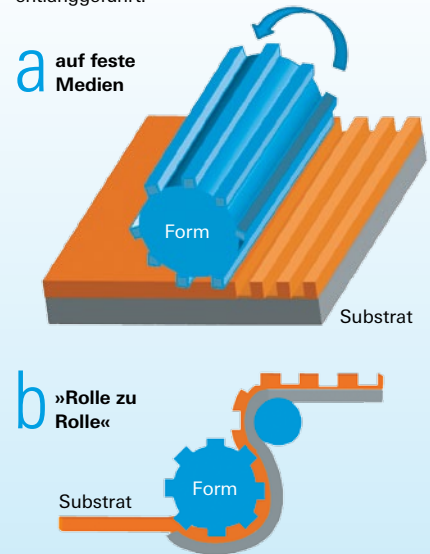
2 Step and Repeat

Ein kleiner Stempel bewegt sich mehrfach über die Fläche.



3 Rotationsprägung

Hier ist die Form zylinderförmig. An ihr wird entweder eine flache Schicht (a) oder eine kontinuierliche, flexible Kunststoffbahn (b) entlanggeführt.



tisches System aus Licht und Linsen die Schaltkreiszeichnungen von einer schablonenartigen Vorlage, genannt Maske, auf eine Siliziumscheibe – einen »Wafer«, der vorher mit einem lichtempfindlichen Polymer überzogen wurde, dem so genannten Fotolack. Nach der Bestrahlung wird der Wafer mit einer Entwicklerflüssigkeit behandelt. Setzt man einen »positiven« Fotolack Licht aus, dann kann ihn der Entwickler lösen, und er wird ausgewaschen. Danach bleibt nur noch der von der Maske verdeckte Teil erhalten. Ein »Negativlack« dagegen wird unlöslich, weshalb anschließend nur die vor der Strahlung abgeschirmten Bereiche verschwinden.

Ein derart vorbehandelter Siliziumwafer lässt sich dann weiterbearbeiten. In die von der Maske frei gelegten Bereiche kann man beispielsweise zusätzliche Vertiefungen ätzen oder chemische Verbindungen einbringen. Der Fotolack selbst wird danach meist wieder entfernt.

Die Schaltkreise auf einem Siliziumchip bestehen aus vielen Schichten, und jede von ihnen hat eine ganz eigene

Geometrie. Deshalb müssen die einzelnen Arbeitsschritte für jede Ebene wiederholt und die Lagen bei der Herstellung präzise zueinander ausgerichtet werden.

Mitte der 1970er Jahre erreichten Ingenieure dabei einen minimalen Abstand der einzelnen Schaltkreiselemente von 700 Nanometern. Dank enormer technischer Fortschritte und immer raffinierterer Masken gelang es der Industrie seither, die Auflösung der Fotolithografie beträchtlich zu steigern. Dabei begrenzen stets fundamentale Gesetze der Optik, wie stark ein Strahl fokussiert werden kann. Deswegen werden Laser mit immer kürzeren Wellenlängen benötigt, um zunehmend feinere Strukturen herauszuarbeiten.

Die Abmessungen schrumpfen – der technische Aufwand wächst

Laserquellen mit ultravioletten Strahlen reduzierten die möglichen Abmessungen in den späten 1990er Jahren auf weniger als 100 Nanometer. 2011 setzte die Firma Intel erstmals ein Herstellungsverfahren für eine neue Gerätearchitektur mit 22 Nanometern ein, den so genannten Tri-Gate-Transistor (Bild rechte Seite oben). Heute sind sogar Strukturen von bis zu 14 Nanometer Größe möglich.

Es fällt der Industrie jedoch immer schwerer, die Auflösung der Fotolithografie weiter zu verbessern. Zwar gibt es prinzipiell Verfahren etwa mit Elektronen- oder Ionenstrahlen, die bis auf wenige Nanometer genau entlang der Materialien fahren können. Doch damit dauert es so lange, ein Werkstück zu bearbeiten, dass sie sich zwar für Prototypen, aber nicht für die Serienproduktion eignen.



FOTOLIA / DANIEL700

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Der nächste logische Schritt scheint daher, die bewährte Herstellung mit Hilfe von Masken mit einer noch kleineren Wellenlänge fortzuführen: extrem ultraviolettem Licht. Diese Art Strahlung wird aber von praktisch jedem Stoff rasch absorbiert. Der Vorgang erfordert also sehr leistungsfähige Quellen, spezielle Masken, fundamental andere Optiken sowie neue Lackschichten, die bei diesem intensiven Licht funktionieren. Der Prozess muss sich außerdem im Vakuum abspielen, da selbst Luft den Strahl zu stark abschwächt. All das ist aufwändig und entsprechend teuer.

Diese Herausforderungen verschaffen der zweiten Top-down-Methode zunehmende Aufmerksamkeit: der Nanoprägelithografie. Im Unterschied zu ihrem optischen Verwandten ist sie ein mechanischer Prozess – die Muster entstehen, indem man den Lack in Form presst. Diese Technik ist in der Halbleiterindustrie noch nicht besonders verbreitet. Aber sie hat sich bereits in einigen Nischenmärkten etabliert, etwa bei Oberflächenbeschichtungen, ultrakompakten Linsensystemen, Festplattenspeichern und in der Biotechnologie.

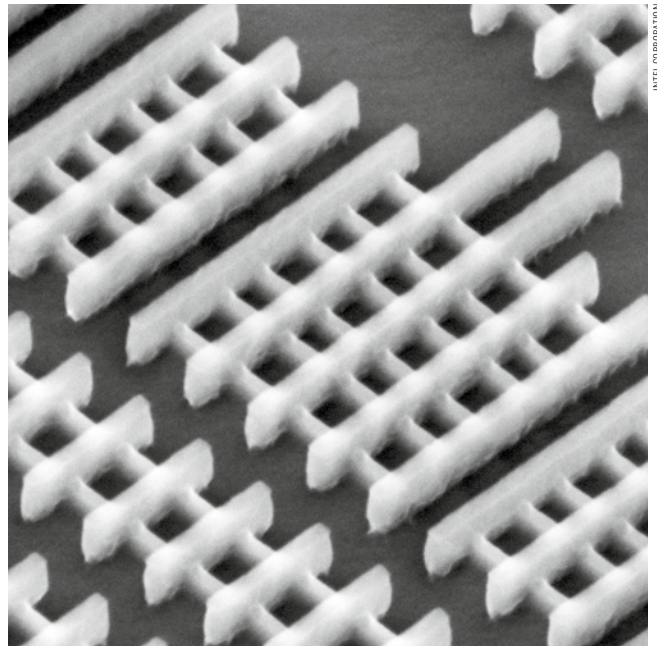
Der Grundgedanke hat seine Wurzeln in so alten Verfahren wie der Anfertigung von Metallmünzen und Wachssiegeln. Der Nanowissenschaftler Stephen Chou von der Princeton University übertrug die Idee 1995 auf die Nanoskala und führte den dafür heute oft verwendeten englischen Begriff Nanoimprinting ein. Er produzierte damals bereits Strukturen von 25 Nanometer Größe. Zwei Varianten dominieren heute: die thermische Nanoprägelithografie, auch Heißprägelithografie genannt, und die UV-basierte Nanoprägelithografie.

Optische Begrenzungen spielen keine Rolle, wenn man Strukturen rein mechanisch formt

Bei der Heißprägelithografie überzieht man das Substrat mit einem hitzeempfindlichen Polymer. Eine Negativform mit einem hochpräzisen Muster darauf wird nun auf das erhitzte Polymer gedrückt. Dieses ist etwa 20 bis 50 Grad Celsius wärmer als seine so genannte Glasübergangstemperatur, bei welcher es allmählich zäh wird. Derart verflüssigt füllt der Stoff alle Hohlräume des Negativs. Beide Teile bleiben in Kontakt und kühlen ab, bis die Beschichtung erstarrt. Nach Entfernen der Form kann man die Oberfläche direkt verwenden. Die Muster können aber auch analog zum Fotolack als Maske dienen, um etwa mit Hilfe eines Ätzvorgangs das darunterliegende Substrat weiter zu bearbeiten.

Die UV-Nanoprägelithografie arbeitet ähnlich wie die thermische. Das dabei verwendete Polymer ist flüssig und härtet unter ultraviolettem Licht aus. Die Form besteht beispielsweise aus speziellem Quarz, das für solche Wellenlängen durchlässig ist. Bei dieser Methode kann der gesamte Prozess bei Raumtemperatur ablaufen.

Ein entscheidender Vorteil gegenüber der Fotolithografie: Bei der mechanischen Verformung spielen jene Beugungsgesetze des Lichts keine Rolle, die bei den klassischen Halbleitertechnologien die Auflösung begrenzen. Die Nanoprägelithografie erfordert also keine teuren Lichtquellen und komplizierten Optiken. Die nötigen, viele Male verwendbaren Formen lassen sich beispielsweise mit den erwähnten



Mit modernster Halbleitertechnologie und UV-Licht lassen sich immer dünnere Strukturen und Schaltkreise mit mehreren, übereinanderliegenden Schichten herstellen, wie bei diesem Tri-Gate-Transistor von Intel. Heute sind bis zu 14 Nanometer möglich – aber die Techniken dafür werden immer komplizierter und teurer.

Elektronenstrahlen hochpräzise herstellen. Zudem verträgt sich der Prozess mit flexiblen Polymerschichten, was eine größere Formenvielfalt in weniger Schritten ermöglicht und die maschinelle Verarbeitung erleichtert.

Die Verfahren für das Nanoimprinting lassen sich grob in drei Typen einteilen: Einzelschritt-, »Step and Repeat«- sowie Rotationsprägung (siehe Illustration linke Seite oben). Im ersteren Fall haben die Formen die gleiche Größe wie die zu bedruckenden Halbleiterscheiben. Beim Step-and-Repeat-Verfahren prägt der Stempel in jedem Schritt nur einen kleinen Bereich und bewegt sich dann weiter zu einem noch nicht bedruckten Abschnitt. Die Form kann also kleiner sein als das geprägte Muster. Dadurch lassen sich Herstellungskosten bei fein strukturierten Masken sparen. Für diese beiden Methoden verwendet man einzelne Halbleiterringe. Die Rotationsprägung hingegen produziert kontinuierlich. Das steigert den Durchsatz erheblich. Rotationsmaschinen können sowohl plane Materialien bearbeiten als auch flexible Substrate über mehrere Rollen führen. Bereits 1998 erreichte diese Technik eine Auflösung von weniger als 100 Nanometern.

Doch erst allmählich schafft die Nanoprägetechnik den Weg aus den Laboren in die Massenproduktion. Das liegt vor allem an zwei Marktsegmenten für moderne Alltags-elektronik, die im letzten Jahrzehnt enorm wuchsen: die so genannte Wafer-Level-Optik und helle Leuchtdioden (LEDs).

Bei Ersterer stellt man auf der Grundfläche einer Leiterplatte sehr viele miniaturisierte optische Bauteile nebeneinander her, beispielsweise winzige Linsen für extrem

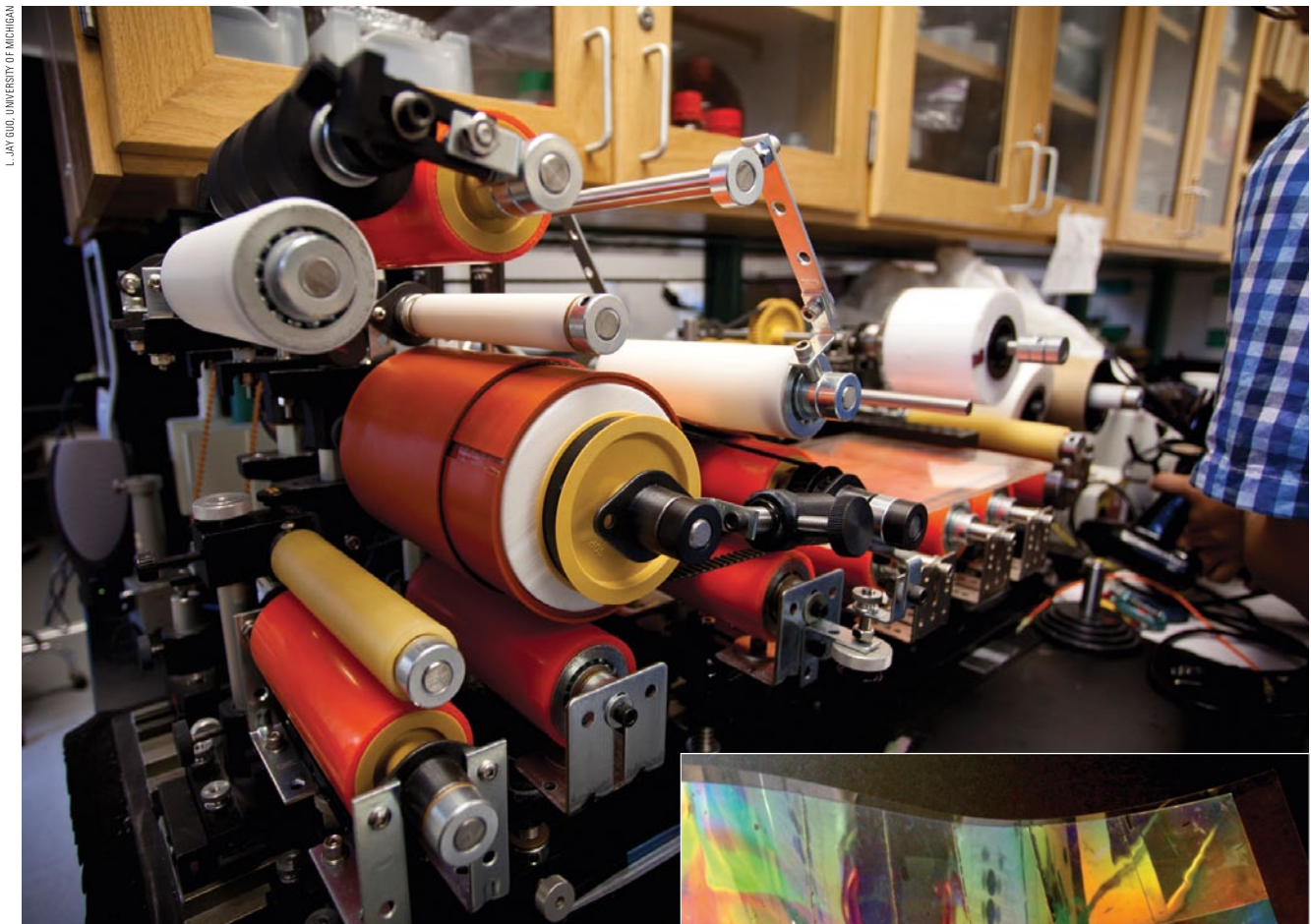
kompakte Kameras in Smartphones. Beim anderen boomenden Markt, den lichtstarken LEDs, lässt sich durch Nanostrukturierung die Effizienz erheblich verbessern. Beides machte zunehmend Produzenten auf das Nanoprägen aufmerksam.

LEDs werden aus Verbindungshalbleitern hergestellt. Diese haben einen deutlich höheren Brechungsindex als Luft, weshalb ein Teil des erzeugten Lichts innerhalb der Diode gefangen bleibt. Periodische Strukturen von wenigen hundert Nanometer Größe auf der Oberfläche verringern den Effekt. Das steigert die Lichtausbeute deutlich.

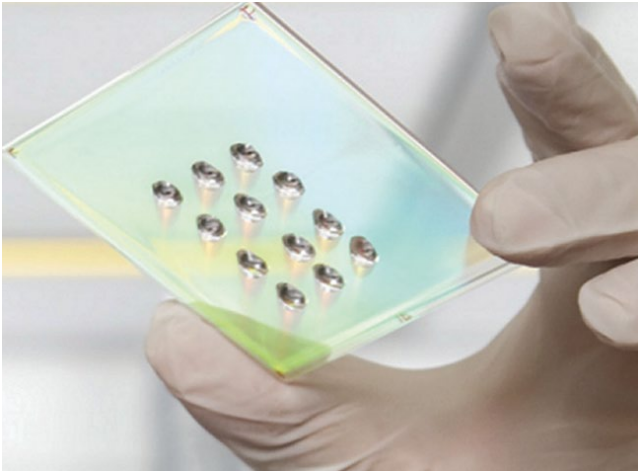
Konventionelle optische Lithografie lässt sich bei LEDs allerdings oft nicht einsetzen, weil das Halbleitersubstrat nicht so eben ist wie die üblichen Siliziumwafer – und wegen dieser Welligkeit lässt sich die Maske nicht scharf darauf projizieren. Im Vergleich dazu ist Prägen deutlich einfacher, da es rein mechanisch abläuft. Dabei kann man beispielsweise flexible Einwegpolymerstempel als Zwischenform einsetzen, die wiederum aus einer festen Vorlage

angefertigt werden. Das erleichtert die Übertragung der Strukturen auf die ungleichmäßige LED-Oberfläche und erhöht zusätzlich die Lebensdauer der aufwändig mit konventionellen Techniken gefertigten Ursprungsform.

Eine dritte Schlüsselanwendung treibt die kommerzielle Entwicklung der Nanoprägelithografie zusätzlich an: Festplattenlaufwerke. Der Bedarf an möglichst kompakten Speichermedien steigt seit Jahren enorm, und die Erhöhung der Kapazität stößt an technische Grenzen. Herkömmliche Festplatten wählen zur Speicherung der einzelnen Datenbits mikroskopisch kleine Bereiche auf einem kontinuierlichen, magnetisierbaren Medium. Es gibt aber eine Größenschwelle von einigen zehn Nanometern für die Areale, unterhalb derer sie zunehmend anfällig für thermische Fluktuationen und störende Wechselwirkungen mit ihren Nachbarn werden. Das führt schließlich zum Verlust von Daten. Wegen dieses »superparamagnetischen Effekts« bestehen einzelne Bits aus vielen benachbarten magnetischen Bereichen.



Im Rotationsbetrieb lassen sich breite, lange und flexible Kunststoffbahnen mit mikroskopisch kleinen Mustern bedrucken. Diese Aufnahmen stammen von einer Arbeitsgruppe an der University of Michigan, die unter anderem Filterfolien entwickelt, welche die Effizienz von Displays oder Solarzellen verbessern.



Nanogeprägte Strukturen ähnlich denen an der Oberfläche einer Rosenblüte halten Wassertropfen fest, selbst wenn die damit beschichtete Platte umgedreht wird.

Eine viel versprechende Methode, diese Schranke zu überwinden, setzt auf so genannte bitgemusterte Medien. Per Lithografie lassen sich physikalisch klar getrennte magnetische Nanostrukturen herstellen, von denen jede ein Bit darstellt. Da die einzelnen Speicherorte räumlich separiert sind, beeinflussen sie ihre Nachbarn weniger, und Daten können kompakter gespeichert werden. Zum Beispiel sind für Kapazitäten von zehn Terabyte pro Quadrat Zoll (die in dieser Branche übliche Flächeneinheit, etwa 6,5 Quadrat-zentimeter) Abstände von neun Nanometern zwischen den Bits erforderlich – was mit Nanoprägelithografie möglich wäre. Die heutige Grenze kommerzieller Festplatten liegt dagegen noch bei etwa einem Terabyte pro Quadrat Zoll.

Formen nach dem Vorbild der Natur am Fließband gedruckt

Auch außerhalb seines traditionellen Elektronikfelds gibt es Anwendungen für das Nanoprägen, zum Beispiel im Grenzbereich von Medizin und Materialwissenschaft: der Biotechnologie. Bei Diabetes und anderen Erkrankungen etwa nutzen Geräte zur Heimdiagnostik winzige Mengen von Körperflüssigkeiten und bestehen oft aus Einwegkunststoff. Die Nanoprägelithografie kann solche Polymere direkt formen und ermöglicht daher preiswerte, extrem kompakte Instrumente. Das Nanoimprinting funktioniert sogar bei biologisch abbaubaren und biokompatiblen Stoffen. Dabei ist es günstig, dass die Fertigung rein mechanisch abläuft; viele solcher Materialien werden nämlich von Lösungsmitteln wie Wasser oder anderen Chemikalien zersetzt und würden den feuchten Entwicklungsprozess der herkömmlichen optischen Lithografie nicht überstehen.

Ein weiterer Bereich der Biotechnologie, in dem Nanoprägen helfen kann, ist die Gewebezüchtung, eine Alternative zu herkömmlichen Transplantationen bei Patienten. Auf diesem Gebiet befassen sich Biologen etwa damit, wie die Eigenschaften von Oberflächen die Entwicklung und Funktion der darauf wachsenden Zellen beeinflussen. Um diesen Effekt statistisch aussagekräftig zu untersuchen, müssen

verschiedenste Strukturen im Mikro- und Nanometerbereich in großer Stückzahl hergestellt werden. Nanoprägen kann die Forschung hier also deutlich verbilligen.

Viele Nanowissenschaftler schauen sich Strategien von der Natur ab, um »bionische« Produkte herzustellen. Zum Beispiel entstehen vor allem mit der kontinuierlichen Rotationsprägung dünne, flexible Kunststoffe mit besonderen Oberflächen. Erste kommerzielle Nutzer dieses Verfahrens verwenden es für optisch wirksame Filme: Nanomuster werden dem Plastik aufgeprägt und verleihen dem Material die gewünschten lichtbrechenden Eigenschaften.

Meine Mitarbeiter und ich haben an unserem Institut beispielsweise an durchsichtigen Schichten gearbeitet, welche die antireflektierende Nanostruktur des Mottenauges nachempfinden. Im Vergleich zu herkömmlich entspiegelten Oberflächen mit mehreren einzelnen Schichten funktionieren diese Nanostrukturen über einen größeren Bereich von Wellenlängen und Einfallswinkeln (siehe auch »Rundum verborgen«, *Spektrum* August 2016, S. 40).

Eine weitere Arbeit unseres Teams wurde durch die Blätter von Rosenblüten inspiriert, die mit winzigen, gleichmäßig verteilten konischen Vorsprüngen überzogen sind. Rotationsgeprägte Polymere mit ähnlichen Mustern halten Wassertropfen fest, selbst wenn ihre Oberseite nach unten gedreht wird (siehe Foto oben links). Potenzielle Anwendungen könnten Gewächshäuser oder Tausammlanlagen sein, um dort die Kondensation gezielt zu beeinflussen. Auch hochwertige Kristalle für die Proteinforschung werden häufig mit Hilfe hängender Tropfen gezüchtet; nanogeprägte Oberflächen könnten den Ertrag dieses Prozesses erhöhen.

Ein anderes Projekt von meinen Kollegen und mir wird bereits kommerziell umgesetzt. Es handelt sich um so genannte Lentikularlinsen, die einem Kunststofffilm aufgeprägt werden. Dieser dient dann als transparenter Überzug für Displays, um ein 3-D-Bild zu erzeugen, ohne dafür Spezialgläser einsetzen zu müssen. In einfacherer Form ist der Effekt solcher Linsenraster von Wackelbildern bekannt.

Besonders bei der Rotationsnanoprägung sehen wir noch zahlreiche weitere Einsatzgebiete. Sie wird am Ende vielleicht die Technologie sein, mit der viele solcher Produkte erschwinglich, leicht und leistungsstark genug sein werden, um Einzug in unseren Alltag zu halten. ◀

QUELLEN

Ahn, S. H. et al.: High Volume Nanoscale Roll-Based Imprinting Using Jet and Flat Imprint Lithography. In: Proceedings of SPIE 9049, Alternative Lithographic Technologies VI, 90490G, 2014

Chou, S. Y. et al.: Imprint Lithography with 25-Nanometer Resolution. In: Science 272, S. 85–87, 1996

Law, J. B. K. et al.: Bioinspired Ultrahigh Water Pinning Nanostructures. In: Langmuir 30, S. 325–331, 2014

Malloy, M., Litt, L. C.: Technology Review and Assessment of Nanoimprint Lithography for Semiconductor and Patterned Media Manufacturing. In: Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS 10, 032001, 2011

© American Scientist

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

JUGENDSTREICH EINER

FIELDS-MEDAILLISTIN

Maryam Mirzakhani, die erste Frau, die je mit der Fields-Medaille ausgezeichnet wurde, hat 1996 als 19-Jährige ein Ergebnis erzielt, das bis heute Bestand hat.



Michael Joswig ist Einstein-Professor für diskrete Mathematik und Geometrie an der Technischen Universität Berlin. Er entwickelte die Software »polymake« mit, die heute ein Standardprogramm bei der Erforschung der diskreten Geometrie ist.

» spektrum.de/artikel/1420974

► Mirzakhanis mathematisches Wirken begann mit einer Fragestellung, die sich aus dem berühmten Vierfarbenproblem herleiten lässt: Ist es möglich, mit nur vier Farben alle Länder einer beliebigen Landkarte so einzufärben, dass nirgends zwei gleichfarbige Länder ein Stück gemeinsame Grenze haben? Dabei ist unter »einem Stück Grenze« mehr als nur ein Punkt zu verstehen.

Der erste Schritt zur Lösung des Problems besteht in einer Umformulierung. Man ersetzt jedes Land durch einen einzigen Punkt (einen »Knoten«) und verbindet zwei Knoten durch eine Linie (eine »Kante«) genau dann, wenn die beiden Länder aneinandergrenzen. Damit hat man die Landkarte in einen so genannten Graphen verwandelt.

Graphentheorie ist ein sehr ergiebiges Teilgebiet der Mathematik, weil einerseits ihre Gegenstände sehr abstrakt sind und damit eine Fülle von Aussagen erlauben: Kanten und Knoten haben zunächst überhaupt keine Eigenschaften, außer dass die einen die anderen miteinander verbinden. Andererseits ist es bei vielen Anwendungen sinnvoll, von den Eigenschaften der Gegenstände (zum Beispiel ganzer Länder) abzusehen und sich nur auf deren Verbindungen zu konzentrieren.

Das gilt nicht nur für die Hersteller von Landkarten. Zum Beispiel dürfen in Mobilfunknetzen zwei Sender, deren Einzugsgebiete sich überlappen, nicht dieselbe Frequenz verwenden, um störende Interferenzeffekte zu vermeiden. Ähnlichen Konflikten muss man beim detaillierten Ausgestalten eines Computerprogramms aus dem Weg gehen; die knappen Systemressourcen sind in diesem Fall die Register, jene sehr schnell veränderbaren Speicherplätze innerhalb

des Prozessors, in denen zum Beispiel Zwischensummen aufaddiert werden.

Bei Landkarten, Mobilfunknetzen und ähnlichen Gegenständen geht es insbesondere um »einfache« Graphen. Das heißt, der Graph enthält nur endlich viele Knoten, keine Kante verbindet einen Knoten mit sich selbst, es gibt zwischen zwei beliebigen Knoten nie mehr als eine Kante, und die Kanten tragen keine zusätzlichen Eigenschaften wie zum Beispiel eine Zahl oder eine vorgeschriebene Richtung, in der sie zu durchlaufen wären.

Bei der Landkartenfärbung und verwandten Problemen geht es allerdings darum, jedem Knoten des Graphen eine Eigenschaft zuzuweisen, nämlich seine Farbe. Man bekommt gewissermaßen an jeden Knoten ein Sortiment von Farbtöpfen hingestellt und muss jeweils einen davon so auswählen, dass nirgends zwei Knoten, die durch eine Kante verbunden sind, mit derselben Farbe angemalt werden.

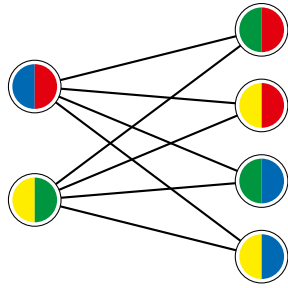
Einen von vielen zentralen Sätzen auf diesem Gebiet bewiesen 1976/77 Kenneth Appel und Wolfgang Haken (gemeinsam mit John B. Koch). Dieser Vierfarbensatz besagt, dass jeder planare (kreuzungsfrei in der Ebene darstellbare) Graph 4-färbbar ist. Es reicht also aus, wenn an jedem Knoten dieselbe Palette aus vier Farben zur Verfügung steht (**Spektrum** Oktober 1978, S. 82). Da der Beweis zu einem wesentlichen Teil auf Computerberechnungen beruhte, entstand damals eine Diskussion darüber, inwieweit man einem solchen Beweis trauen dürfe. Spätestens 2005 hatte sich das Thema aber erledigt, als Georges Gonthier und Benjamin Werner einen formalisierten Beweis des Vierfarbensatzes in der Programmiersprache Coq vorlegten.

Maryam Mirzakhani



PRIVAT / STANFORD UNIVERSITY

Die Islamische Republik Iran hat sich nicht unbedingt die Förderung der Wissenschaft auf ihre Fahnen geschrieben, und definitiv nicht die Frauenförderung. Gleichwohl sieht sich Maryam Mirzakhani, 1977 in Teheran geboren, nicht als Opfer des Systems. Vielmehr sei das Ende des Kriegs mit dem Irak 1988 für sie zu einem günstigen Zeitpunkt gekommen. Der Schülerin Mirzakhani gelang es mit Hilfe ihrer Schulleiterin, an den Internationalen Mathematik-Olympiaden 1994 und 1995 teilzunehmen; beide Male brachte sie eine Goldmedaille nach Hause. Ihren Bachelor erlangte sie 1999 im Iran, an der Scharif-Universität für Technologie. Anschließend ging sie nach Harvard, um bei Curtis McMullen, einem der Fields-Medaillisten von 1998, zu promovieren. In ihrer Dissertation von 2004 klärte sie Fragen, welche die Fields-Preisträger Edward Witten (1990) und Maxim Kontsevich (1998) offengelassen hatten. Nach Stationen am Clay Mathematics Institute und in Princeton ist sie seit 2008 Professorin an der Stanford University. Auf dem Internationalen Mathematiker-Kongress in Seoul 2014 erhielt sie die in ihrer Bedeutung dem Nobelpreis vergleichbare Fields-Medaille (**Spektrum** September 2014, S. 23).



Der vollständig bipartite Graph $K_{2,4}$. Egal wie man aus den vorgegebenen Farblisten wählt, es entsteht keine gültige Färbung.

In ihrer frühen Arbeit hat sich Mirzakhani mit einer Verschärfung des Vierfarbenproblems befasst. Kann man auch dann noch eine korrekte Färbung finden – keine zwei benachbarten Knoten gleichfarbig –, wenn das Sortiment der verfügbaren Farben nicht an jedem Knoten dasselbe ist? Die Aufgabe läuft auf ein Spiel zwischen zwei ungleichen Partnern hinaus: Der gute Anstreicher versucht, mit den an jeden Knoten gelieferten Farben eine korrekte Färbung herzustellen, der böse Lieferant stellt an jeden Knoten Farbtöpfe mit der Absicht, genau das zu vereiteln. Wer von beiden gewinnt, hängt entscheidend davon ab, wie der Graph gebaut ist. Ein Graph heißt k -listenfärbbar, wenn der Gute stets gewinnen kann unter der Voraussetzung, dass der Böse an jeden Knoten genau k Farben seiner Wahl liefert.

Jeder k -listenfärbbare Graph ist automatisch auch k -färbbar, denn die Lieferung »dieselben k Farben an jeden Knoten« zählt zu den Optionen, die dem Bösen zur Verfügung stehen (und auf die der Gute eine Antwort hat). Die Umkehrung gilt nicht: Der »vollständig bipartite Graph $K_{2,4}$ « (Bild

links) ist zwar 2-färbbar – man male die linken Knoten gelb und die rechten blau –, aber nicht 2-listenfärbbar; denn aus den im Bild dargestellten Farbsortimenten lässt sich keine korrekte Färbung gestalten.

In ihrer Arbeit von 1996 gab Maryam Mirzakhani einen planaren – nach Appel und Haken also 4-färbbaren – Graphen mit 63 Knoten an, der nicht 4-listenfärbbar ist. Die Existenz solcher Graphen hatten Paul Erdős, Arthur L. Rubin und Herbert Taylor 1979 vermutet. Bereits 1993 hatte Margit Voigt, heute Professorin an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Dresden, dies durch eine Konstruktion mit 238 Knoten bestätigt. Mirzakhanis Arbeit stellt eine Verbesserung dar, weil sie mit deutlich weniger Knoten auskommt. Viel interessanter an Mirzakhanis Graph ist aber, dass er im Gegensatz zu Voigts Konstruktion sogar 3-färbbar ist. Und dies erledigte ein damals offenes Problem. Übrigens zeigte Carsten Thomassen von der Technischen Universität Dänemarks in Lyngby kurz darauf, dass jeder planare Graph 5-listenfärbbar ist.

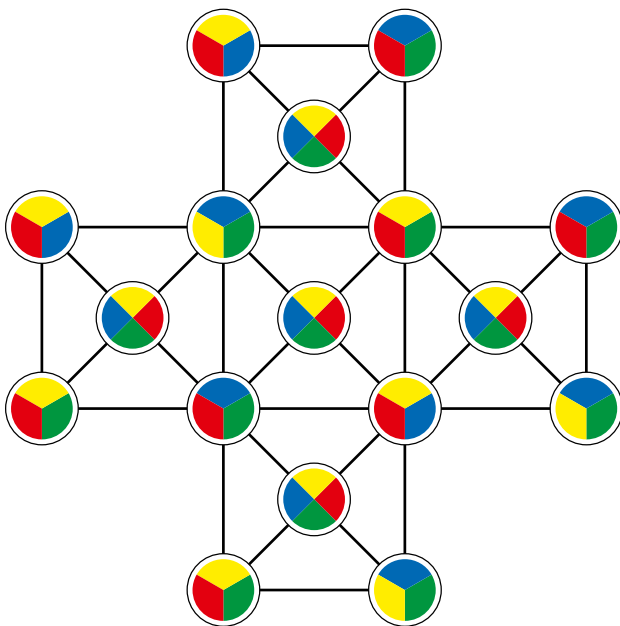
Wie hat nun Mirzakhani einen 3-färbbaren planaren Graphen gebaut, der nicht 4-listenfärbbar ist? Der entscheidende Baustein ist ein kleiner planarer Graph; nennen wir ihn B (Bild links unten). Seine 17 Knoten gehören zu zwei verschiedenen Klassen: »innere« mit vier Nachbarn und vier Farben zur Auswahl, das sind alle Farben, die überhaupt vorkommen; und »äußere« mit nur drei Farben und drei oder sieben Nachbarn.

Aus einer Unlösbarkeit für einen kleinen Graphen konstruiert Mirzakhani eine für einen großen Graphen

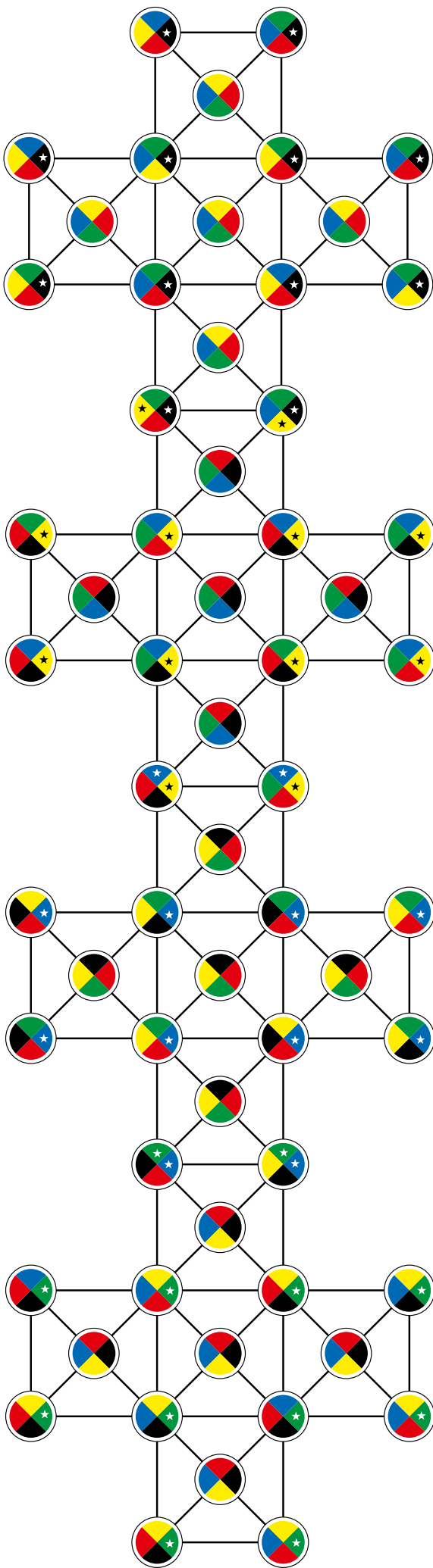
Dass Graph B 3-färbbar ist, sieht man ohne große Mühe: Färbt man zum Beispiel alle inneren Knoten rot und die äußeren abwechselnd gelb und blau, tut sich kein Widerspruch auf. Aber mit den im Bild angegebenen Farblisten ist eine Färbung dieser Art nicht zu realisieren, auch nicht, wenn man zum Beispiel die inneren Knoten blau statt rot färbt. Es gibt überhaupt keine korrekte, das heißt listengetreue Färbung. Um sich dessen zu vergewissern, müsste der gute Anstreicher im Prinzip alle Möglichkeiten durchprobieren. Aber diese Arbeit ist schneller erledigt, als es den Anschein hat; man kann sich nämlich zahlreiche Färbungsversuche sparen, weil sie zum Beispiel durch Drehung des ganzen Graphen und Vertauschen von Farben auf bereits gescheiterte Versuche zurückzuführen sind.

Mit diesem Baustein B ist die Sache nun recht einfach zu Ende zu führen. Man nimmt vier Kopien von B plus einen weiteren Knoten, den man mit allen äußeren Knoten verbindet. Nun wählt man vier neue Farben namens a , b , c und d , so dass insgesamt acht Farben auftreten. In der ersten Kopie von B fügt man allen äußeren Knoten a als vierte Farbe zur Palette hinzu, in der zweiten Kopie an den entsprechenden Stellen die Farbe b , und so weiter. Der Extraknoten erhält alle vier neuen Farben a , b , c und d . Auf diese Weise entsteht ein planarer Graph mit $4 \cdot 17 + 1 = 69$ Knoten und Farblisten der Länge 4.

Die zugehörige Listenfärbungsaufgabe hat keine Lösung. Der Grund liegt in der Sonderrolle des Extraknotens. Nehmen wir an, wir würden ihn mit a färben. Dann wäre a für alle äußeren Knoten in der a -Kopie von B verboten. Dadurch



Der Graph B mit einer Listenfärbungsaufgabe ohne Lösung.



CHRISTOPH PÖPPE, NACH MICHAEL JOSWIG, INSTITUT FÜR MATHEMATIK, TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

entsteht in diesem Teilgraphen genau die Listenfärbungsaufgabe für B , deren Unlösbarkeit bereits nachgewiesen wurde. Entsprechendes gilt, wenn wir den Extraknoten mit einer der anderen Farben versehen. Damit ist der konstruierte Graph mit 69 Knoten nicht 4-listenfärbbar.

Dagegen ist er auf einfache Weise 3-färbbar: Man übertrage die oben als Beispiel angegebene 3-Färbung auf alle vier Kopien von B und färbe den Extraknoten so rot wie alle inneren Knoten.

Damit ist die Sache eigentlich schon erledigt. Mit ein bisschen Feintuning lassen sich dann noch die vier Kopien des Bausteins B so miteinander verschmelzen, dass insgesamt sechs Knoten eingespart werden (Bild links). Allerdings muss man hierfür die Farblisten in den vier Kopien geschickt variieren. Am Ende kommt man mit insgesamt fünf Farben aus. Das Resultat ist der Graph M mit $63 = 69 - 6$ Knoten.

Mirzakhani's Arbeit stellt in ihrer kompakten und luziden Darstellung ein mathematisches Kleinod dar. Das Ergebnis ist meines Wissens bis heute nicht verbessert worden. Ich kenne jedenfalls keinen kleineren 3-färbbaren Graphen, der nicht 4-listenfärbbar ist. Maryam Mirzakhani's besonderes Talent ist hier bereits zu erkennen, gerade weil die Konstruktion so schwerelos leicht ist. ◀

Der Autor dankt Benjamin Lorenz für seine Unterstützung bei der Illustration der Graphen. Eine frühere Version dieses Artikels ist in den »Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung« erschienen (Band 23, Heft 1, S. 43–45, 2015).

QUELLEN

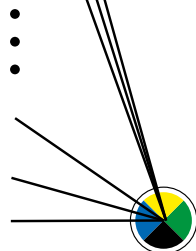
Gonthier, G.: Formal Proof – the Four-Color Theorem. In: Notices of the American Mathematical Society 55, S. 1382–1393, 2008

Mirzakhani, M.: A Small Non-4-Choosable Planar Graph. In: Bulletin of the Institute of Combinatorics and its Applications 17, S. 15–18, 1996

Thomassen, C.: Every Planar Graph Is 5-Choosable. In: Journal of Combinatorial Theory Series B 62, S. 180–181, 1994

Voigt, M.: List Colourings of Planar Graphs. In: Discrete Mathematics 120, S. 215–219, 1993

Der Mirzakhani-Graph M ist 3-färbbar, aber nicht 4-listenfärbbar. Zur Verdeutlichung der Konstruktion sind in den Farblisten der äußeren Knoten in den (verschmolzenen) Kopien von B diejenigen Farben mit Sternchen versehen, die festlegen, zu welcher Kopie von B der jeweilige Knoten gehört.



ÄGYPTEN

DAS GRAB DES MAGIERS

SERIE: SCHRIFT Stark zerfallen und oft kaum mehr lesbar harrt eine Grabbeigabe gut ein Jahrhundert nach ihrer Entdeckung noch immer ihrer systematischen Erforschung: die »Ramesseum-Papyri«. Doch eines erscheint inzwischen sicher: Dies war eine magische Bibliothek.

► spektrum.de/artikel/1420992



Joachim Friedrich Quack leitet das Ägyptologische Institut der Universität Heidelberg. Schriftquellen zu magischen Ritualen bilden einen seiner Forschungsschwerpunkte.

AUF EINEN BLICK BÜCHER FÜR DAS JENSEITS

- 1** Unterhalb des Totentempels Ramses' II. stießen Ägyptologen Ende des 19. Jahrhunderts auf einen Grabchacht aus einer früheren Epoche. Zu den Beigaben gehörten auch einige stark zerfallene Handschriften.
- 2** Die »Ramesseum-Papyri« wurden auf Grund ihres schlechten Zustands kaum untersucht. Nach aktuellem Forschungsstand handelt es sich aber größtenteils um magische Texte wie Liebes- oder Abwehrzauber.
- 3** Im Kontext der sonstigen Funde lassen die Schriften vermuten, dass der Beigesetzte als Magier gearbeitet hatte. Seine Bibliothek und diverse Zauberutensilien sollten diesen Status im Jenseits dokumentieren.

► Mumien und Pyramiden, kunstvolle Goldmasken und Götterstatuen, rätselhafte Wandmalereien und Tempelreliefs – solche materiellen Hinterlassenschaften repräsentieren im Bewusstsein der Öffentlichkeit das antike Ägypten. Doch mag uns auch die Büste der Königin Nofretete durch ihre Anmut in den Bann schlagen, ist ein anderer, weniger attraktiver Fund in ihrer Hauptstadt Amarna für Ägyptologen weit bedeutender: das Archiv des Palasts, das die Korrespondenz der Pharaonen mit Vasallen und anderen Herrschern aufbewahrte. Altägypten war eine Schriftkultur mit allen Spielarten, von der Inventarliste bis hin zu Märchen und Mythen. Sie entwickelte sogar gleich drei verschiedene Schriften für unterschiedliche Zwecke: die Hieroglyphen für Inschriften auf Monumenten sowie das Hieratische zunächst für alle Bereiche, später dann das Demotische primär für die mehr alltäglichen Dinge. Wer das Reich der Pharaonen verstehen will, muss die materiellen Überbleibsel im Kontext der schriftlichen Überlieferung sehen. Das ist mitunter ein ambitioniertes Ziel, wie die so genannten Ramesseum-Papyri zeigen, die mehr als 100 Jahre kaum ein Geheimnis preisgaben.

Ihren Namen verdanken sie dem im 13. Jahrhundert v. Chr. errichteten Totentempel Ramses' II. am Westufer des Nils bei Theben, denn unterhalb der zugehörigen Lagerräume waren die Ägyptologen James Quibell und William Matthew Flinders Petrie 1895 auf jenen Grabchacht gestoßen, der die Schriftstücke enthielt. Die Bezeichnung ist allerdings irreführend, denn die Papyri sind weit älter als das Ramesseum: Der Pharao des Neuen Reichs hatte seine monumentale Tempelanlage über Gräbern des 18. Jahrhunderts v. Chr. errichten lassen. Sicherlich hatten dort gut



ANG IMAGES / WERNER JORMAN

Eine nackte Frauengestalt mit Löwenkopf und Schlangen in den Händen: Diese Statue aus einem Grab des 18. Jahrhunderts v. Chr. diente vermutlich als Werkzeug bei magischen Ritualen.

SERIE
Magie der Schrift

Teil 1: September 2016
Rätselhafter Indus-Kode
von Andrew Robinson

Teil 2: Oktober 2016
Das Grab des Magiers
von Joachim Friedrich Quack

Teil 3: November 2016
Qumran – Kultort, Schreibstube, Wissensspeicher
von Friederike Schücking-Jungblut

Teil 4: Dezember 2016
Buchstaben, Begehren und Tod – fantastische Literatur im Mittelalter
von Ludger Lieb

situierte Personen ihre letzte Ruhestätte gefunden, doch zählten sie offenbar noch nicht zur Elite. Denn ihre Gräber waren meist schmucklos, auch fehlten Inschriften, welche damals die Bedeutung des Verstorbenen unterstreichen sollten – und dem Forscher heute wichtige Informationen zur Einordnung der Anlage geben könnten.

Was die Entdecker ans Licht brachten, erhielten, wie damals üblich, Personen und Institutionen, die zur Finanzierung der Grabungskampagne beigetragen hatten. Heute befinden sich die meisten Stücke in Manchester, andere in Cambridge, London und Philadelphia. Dazu gehören auch allerlei kleine Objekte, die Aufschluss über den Inhaber des Grabs geben können. Etliche davon bringen Experten mit magischen Praktiken in Verbindung. Ein besonders spektakuläres Stück ist beispielsweise eine hölzerne, nackte Frauengestalt mit Löwenkopf, die Schlangen in den Händen hält (siehe Bild S. 81). Solche Objekte wurden nach heutigem Wissen bei Schutzritualen verwendet. Mütter und Neugeborene vor Unheil zu bewahren, war der Zweck der vier »Zaubermesser« (siehe Bild S. 84), die Spuren eines intensiven Gebrauchs aufwiesen. Sie waren aus Nilpferdzähnen geschnitzt und mit Ritzzeichnungen von Tieren wie Katzen und Kröten sowie fantastischen Wesen versehen worden, darunter ein Panter mit Schlangenhals und ein Gepard mit Flügeln und einem Menschenkopf auf dem Rücken.

Weitere magische Utensilien waren mit Messern bewaffnete Schutzgottheiten, ein Elfenbeinstab mit Darstellungen von Löwen und ein Musikinstrument – eine Klapper. Bemerkenswert ist auch eine bronzene Kobra, die in Resten einer Haarmasse aufgefunden wurde. Möglicherweise war dies einst eine Perücke, welche die des Königs imitierte: Der Pharao trug als Diadem eine Speikobra aus Gold, auf dass diese Gift gegen seine Feinde spuckte.

Der aus Sicht des philologisch arbeitenden Ägyptologen wichtigste Fund aber war eine weiß verputzte Holzkiste,

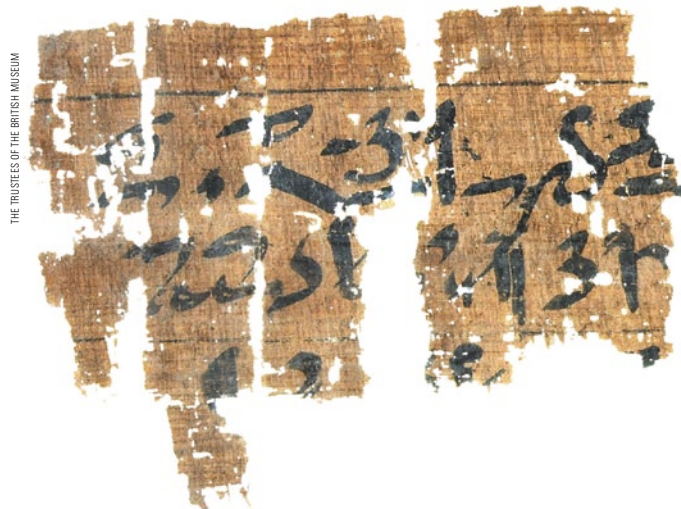


Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

deren Deckel laut Ausgrabungsbericht die Zeichnung eines Schakals zierte. Das Objekt gilt inzwischen als verschollen; weitere Details etwa zur Körperhaltung des Tiers wurden nicht dokumentiert. Eine Deutung im Hinblick auf den Totengott Anubis oder einen anderen Schakalgott ist daher nicht möglich. In der Kiste befanden sich zahlreiche Binsen, also das ägyptische Schreibgerät, vor allem aber die Überreste vieler Papyrusrollen, von denen die meisten im British Museum in London, einige wenige auch im Ägyptischen Museum in Berlin aufbewahrt werden.

Die Schriftträger bestanden aus extrem feinem Papyrus, doch die hohe Qualität von einst erwies sich für die Ägypto-



»Meine Brust sehnt sich nach dir, wie das Herz des Horus nach seinem Auge« – beschrieb dieser Papyrus einst einen Liebeszauber? Die Analogien zwischen Menschen- und Götterwelt deuten darauf hin.

logen als Problem: Das Material war äußerst brüchig. Schon beim Öffnen der Kiste lagen die Rollen nur noch in Fragmenten vor, und der erste Eindruck war, dass diese bei bloßer Berührung zerfallen würden.

Flinders Petrie übernahm die Bearbeitung der Papyri. Er erwog zunächst, die jeweils sichtbare Fläche einer Rolle abzuzeichnen und danach entfernen zu lassen, so dass ihre nächste Wicklung frei lag. Glücklicherweise wurde dieses Vorhaben nie umgesetzt. Unbeachtet lagen die Fragmente einige Jahre lang in einem Regal des University College in London, bis der britische Ägyptologe Percy Newberry versuchte, zwei davon aufzurollen, zur Stabilisierung auf einer mit Bienenwachs eingeriebenen Glasfläche aufzubringen und dann mit einer Glasscheibe abzudecken. Die Arbeiten kamen aber nicht recht voran, bis Flinders Petrie einen Nachwuchsforscher zum Bearbeiter der Papyri auserkor: Alan Henderson Gardiner, der später der wohl berühmteste Ägyptologe überhaupt werden sollte. Gardiner konnte es sich als Sohn aus reichem Hause leisten, seiner Leidenschaft für das Pharaonenreich zu frönen, ohne auf Beruf und Karriere Rücksicht nehmen zu müssen. Vor dem Ersten Weltkrieg lebte er einige Jahre in Berlin, damals das Mekka der Ägyptologen. Gardiner holte Hugo Ibscher mit ins Boot, denn der Papyruskonservator des Ägyptischen Museums galt weltweit als der Beste seines Fachs. Ibscher war es dann, der ab 1903 die Hauptmasse dieser Papyri unter Glas gebracht und für die Wissenschaft zugänglich gemacht hat. Allerdings wurde die letzte Handschrift erst 1937 konserviert. Auch waren Ibschers Methoden nach heutigen Kriterien nicht immer optimal. So zog er zwei Papyri auf Zelluloid auf – eine fatale Entscheidung. Das Material erwies sich als chemisch instabil, entzündete sich Jahrzehnte später und machte die Originale weitgehend unlesbar. Die meisten Fragmente zog der Konservator aber zum Glück auf Gelatinefilm auf, der bislang stabil blieb.

Dergleichen dämpfte Gardiners Enthusiasmus. Zwar publizierte er in den Jahren 1908 und 1909 seine Bearbeitung einer ersten Rolle, doch trug diese zwei bereits aus



THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM

anderen Quellen bekannte Erzählungen, so dass sich fehlende Teile leicht ergänzen ließen. In den folgenden Jahrzehnten holte Gardiner andere Forscher zur Unterstützung und hielt sich selbst im Hintergrund.

Kurt Sethe, damals einer der führenden deutschen Ägyptologen, interessierte sich für religiöse Texte, insbesondere für Dialoge von Gottheiten, die Sethe als Drama bezeichnete. So etwas war auch nach heutigem Wissen eher selten; in Tempeldarstellungen etwa wandten sich Götter an den Pharao, nicht an ihresgleichen. Sethe entdeckte in der Grabbibliothek den »Dramatischen Ramesseumpapyrus«, den er 1928 publizierte. Anders als die meisten Handschriften des Funds war er in Kursivhieroglyphen geschrieben, einem Zwischenstadium in der Entwicklung von den bildlich elaborierten Hieroglyphen zur hieratischen Schrift, das dann aber noch bis ins Neue Reich verwendet wurde. Zudem illustrieren einfache Skizzen eine Abfolge von Handlungen.

Der Pharao als Stellvertreter des Horus

Sie zeigen einen Pharao bei Ritualen, die in den zugehörigen Texten auf die Götterwelt übertragen wurden. So lautet eine Passage: »Es geschah, dass ein Brustlatz gebracht wurde durch den Vorlesepriester. Das bedeutet Horus, wie er seinen Vater Osiris umarmt und sich an Geb mit den Worten wendet: ›Ich habe meinen Vater, der müde war, umarmt, bis er wieder gesund wurde.‹ Osiris – Brustlatz. Osiris – Fransen.« Wie Sethe richtig erkannte, arbeitete dieser Text stark mit lautlichen Analogien. So klang das Wort für das von Ägyptologen als Brustlatz bezeichnete repräsentative Kleidungsstück ähnlich wie das altägyptische Verb »umarmen«, »Fransen« erinnerte lautlich an »gesund werden«.

Der Papyrus enthält offenbar eine Ritualanweisung für den König und seine Priester. Vermittelt durch den Kult sollten diese in der Sphäre der Menschen ein wichtiges mythologisches Ereignis nachvollziehen: Horus, Sohn des Herrschers über die Unterwelt, gibt seinem Vater Osiris neue Kraft. Dies war erforderlich, denn der Gott war von seinem bösen Bruder Seth ermordet und dann von seiner Gemahlin

Isis mit zauberischen Mitteln ins Leben zurückgeholt worden. Doch offenbar war diese Existenz fragil und bedurfte der Erneuerung. Indem der Pharao die entsprechenden Handlungen vollzog, stabilisierte er den Status quo und sicherte damit seinem verstorbenen Vater eine ehrenvolle Stellung im Jenseits.

Ein weiterer Mitstreiter, den Gardiner gewinnen konnte, war der junge Ägyptologe John Barns. Anhand der Faserstrukturen gelang es diesem, zusammengehörende Fragmente von fünf Papyri auszumachen, obwohl sie bei der Verglasung nicht korrekt platziert worden waren. Die Bearbeitung der teilweise literarischen, teilweise medizinischen und erneut magischen Inhalte brach er aber ab, als er eine Festanstellung mit einem anderem Forschungsschwerpunkt erhielt.

Im Alter von gut 75 Jahren publizierte Gardiner 1955 endlich alle noch ausstehenden Handschriften in einem Buch, mithin den größten Teil des Funds. Offenkundig wollte er das seinem Mentor Flinders Petrie gegebene Versprechen zumindest noch ansatzweise einlösen. Denn das Werk bot wenig mehr als Fotografien mit knappen Angaben zum Inhalt der jeweiligen Papyri und Übersetzungsproben. Leider hat sich an dieser Situation bis heute nichts geändert. Einerseits ist das verständlich: Wer sich derart lückenhaften Quellen widmet, wird manche Punkte nie definitiv klären können. Andererseits ist es schade, dass dadurch viele spannende Texte – zumeist magische Praktiken betreffend – nur wenigen Spezialisten bekannt sind. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs »Materiale Textkulturen« der Universität Heidelberg und hier im Projekt »Materialität und Präsenz magischer Zeichen zwischen Antike und Mittelalter« versuchen Ägyptologen diesem Missstand abzuhelpen und die längst aufgerollten Papyri, soweit sie noch lesbar sind, zu edieren.

Besonders originell erscheint dabei ein nur schlecht erhaltener Papyrus (Papyrus Ramesseum XI B, 1–3, siehe Bild oben), dessen lesbarste Passage lautet: »Mein Herz sehnt sich nach dir, meine Brust sehnt sich nach dir, wie das



Herz des Horus nach seinem Auge, das des Seth nach seinen Hoden, das der Hathor nach ihren Haarlocken und das des Thot nach seiner Schulter. Siehe, mein Herz soll gebracht werden, gebunden mit der Sehne eines Reihers. Eine Fackel ist in meiner Rechten, eine Fackel wurde mir in mein Herz gegeben, eine Fackel in meine Brust, bis du zu mir kommst.«

Weil das Altägyptische in der zweiten Person (»dir«, »du«) die Geschlechter unterschied, war dem Rezitierenden beziehungsweise seinen Zuhörern sofort klar, dass die Anrufung einem weiblichen Wesen galt, das im Fokus eines Begehrens stand. Um dieses zu betonen, zitierte der Text Mythen, in denen Gottheiten bei gewalttätigen Auseinandersetzungen Körperteile verloren hatten. Ihre Sehnsucht nach diesen diente hier vermutlich als Analogie für die eines Mannes nach einer Frau. Dann wäre der Spruch einer der wenigen Liebeszauber, die aus dem pharaonischen Ägypten überliefert sind, ja sogar der älteste bekannte. Dazu passt auch das Bild einer Fackel im Herzen, doch bleibt diese These Spekulation, denn leider gibt das Papyrusfragment auf Grund seines desolaten Zustands keine weiteren Informationen preis.

Leichter fällt die Einordnung, wenn ein Titel bereits den Zweck verrät, wie beim »Buch zum Befreien eines Hauses von männlichen und weiblichen Totengeistern und von männlichen und weiblichen Schlangen« (Papyrus Ramesseum IX, 2, 1–8). Offenbar gehört die folgende Passage zum Genre der Schutzzauber: »Zurück, fällt auf eure Gesichter, ihr Rebellen der Nacht und des Tages, die ihr Verhüllung trägt, mit roten Leinenstoffen, Rotte jenes Bösen, des Sohnes der Nut, der im Leib seiner Mutter [...], noch bevor er zur Welt gekommen war! Es gab eine Wehklage über die Unruhe seitens des Horus, nachdem du dessen Vater Osiris tötetest. Wahrlich, ich bin gekommen, nachdem ich mich verwandelt habe in die Rolle meines Sohnes und Erben!« Und in einem stärker angegriffenen Bereich erkennt man noch, dass der Sprecher sich als Horus, Sohn der Isis und Erbe des Osiris, darstellt.

»Sohn der Nut« war der zwielichtige Seth. Einerseits unterstützte er mit seinen magischen Kräften den Sonnengott auf seiner gefährvollen Fahrt durch Himmel und Unterwelt. Doch vor allem war er der Mörder des Osiris, was in dieser Rezitation explizit gesagt wurde – für ägyptische Verhältnisse ungewöhnlich, man sprach nicht gern über Unheil, das Göttern oder Königen widerfuhr. Der unvollständige Nebensatz nimmt wahrscheinlich auf einen Mythos Bezug, dem zufolge Seth nicht normal geboren wurde, sondern sich brutal aus der Seite seiner Mutter herausge-



Aus dem Zahn eines Nilpferds wurde dieses »Zauberermesser« geschnitten, das mit drei weiteren Objekten dieser Art im fraglichen Grab zu Tage kam. Vermutlich diente es bei magischen Ritualen dazu, Mütter und Neugeborene mit Schutz zu versehen. Die Abnutzung des Objekts zeugt von intensivem Gebrauch.

arbeitet hatte; das entsprechende Verb ist allerdings nicht mehr vorhanden. Die Absicht des Zauberspruchs liegt auf der Hand: Man wollte die Götter daran erinnern, dass alles Böse von Seth komme, damit sie alles täten, das betreffende Haus gegen jedwedes Ungemach zu verteidigen.

Thematisch ungewöhnlich ist auch ein Zauberspruch des »Papyrus Ramesseum C verso«. Er richtete sich gegen Widersacher und Rivalen, was zwar nicht im Titel, dafür aber am Textende deutlich wird: »Das bedeutet, Feinde zu vernichten und sie zu beseitigen in jedem Gerichtshof, zu dem man geht.« Die Methode, derer sich der rezitierende Magier bediente, war die Anschuldigung beziehungsweise Verleumdung: Er unterstellte schwere Vergehen gegenüber den Göttern. Damit der Spruch universal einsetzbar war, nannte er den Beschuldigten nie mit Namen, sondern verwendete allgemeine, noch dazu auf beide Geschlechter passende Begriffe.

Als reine Rhetorik ist es wohl auch zu werten, dass man den Gegner in diesem Papyrus nicht als Menschen, sondern als regelrechten Dämon präsentierte. Das sollte von vornherein klarstellen, wie die Götter richten müssten. Zudem scheute sich der Magier nicht, das Objekt der Verfluchung bereits virtuell zu verstümmeln, indem er ihm mit jeder Anrufung einen Körperteil absprach: »Oh jener Feind, männlicher und weiblicher Totengeist, der keine Zehen hat!

Oh jener Feind, männlicher und weiblicher Totengeist, dies ist gravierend, was du gegen Osiris getan hast! Du hast die Meeräsche aufgespießt, als der Sonnengott herankam; du hast Apopis sich aufrichten lassen, als der Sonnengott herankam; du hast ihn zum Himmel heraufkommen lassen, zum Platz des Sonnengottes.«

Wieder appellierte der Sprecher an mythologisches Wissen. Beispielsweise fuhr der Sonnengott in einer Barke über den Himmel und wurde dabei von Fischen wie der Meeräsche begleitet, die ihn vor Gefahren warnten. Zu diesen zählte vor allem der Feind aller Götter, Apopis, eine gewaltige Schlange. Auf dessen Seite zu stehen, war an Verwerflichkeit kaum zu überbieten. Passend dazu beschrieb der Papyrus eine Rezeptur, die während der Rezitation auszuführen war: Man solle den Kot verschiedener Tiere mit Samen einer bitteren Pflanze in einer Schüssel verbrennen und mit Urin ablöschen, die Asche vier Tage ruhen lassen und dann ins Wasser werfen.

Heri-Seshta, der Spezialist für Rituale

Magische Schriften, deren Fundumstände von Archäologen verlässlich dokumentiert wurden, sind eine absolute Rarität. Mag auch der fortgeschrittene Zerfall der Rollen viele Details offenlassen, bereichern sie unser Bild vom alten Ägypten in noch nicht absehbarer Weise! Erhalten sind die Papyri, weil sie in einem Grab deponiert waren, also einer relativ trockenen Umgebung, in der organisches Material langsamer verrottet als im Freien oder in der feuchten Erde. Doch warum wurde dergleichen einem Verstorbenen auf die Reise ins Land der Toten mitgegeben? Wohl gemerkt sind Schriftstücke in Grabinventaren keine Seltenheit, selten aber in einem solchen Umfang, und sie enthalten meist Informationen für die Existenz im Jenseits. Die Ramesseum-Bücher nutzten ihrem Besitzer zudem wohl nur zu Lebzeiten.

Die erwähnten sonstigen Beigaben des Grabschachts sind hier aufschlussreich. Auch sie stehen meist im Kontext magischer Handlungen mit einem nach heutigem Wissensstand deutlichen Fokus auf dem Schutz von Frauen und Kindern, speziell im Umfeld der Geburt. Tatsächlich beschrieben einige der Papyri Heilverfahren und magische Schutzaktionen für diese Klientel, jedoch wurden die aufgefundenen Objekte – etwa die mit Messern bewaffneten Schutzgottheiten – in diesen Anweisungen gar nicht erwähnt. Man muss zudem bedenken, dass manche zauberischen Praktiken der Antike keine spezifische Ausrüstung erforderten. Vermutlich gehörten manche der magischen Ramesseum-Papyri in diese Kategorie. Der archäologische Befund allein liefert also ein verzerrtes Bild der Aktivitäten des Grabinhabers, das die Schriften aber korrigieren – eine wichtige Lehre zur Methodik.

In der Zusammenschau aller Informationen entpuppt sich der Grabinhaber mit hoher Wahrscheinlichkeit als Ritualist, das heißt als Spezialist für magische Rituale; in diesem Fall hatte der Verstorbene wohl seinen Schwerpunkt im Bereich Not- und Mangelsituationen des Lebens. Die erwähnte Zeichnung auf dem Deckel der Kiste, in der sich die Bibliothek befand, erinnert möglicherweise ebenfalls daran: Ein liegender Schakal wäre auch die Hieroglyphe für »Heri-Seshta«, das altägyptische Wort für einen Ritualisten.

Der archäologische Befund allein liefert ein verzerrtes Bild, das die Schriften korrigieren

Leider gibt es nur wenige Belege darüber, wie Magie im Nilstaat praktiziert wurde, so dass vieles Spekulation bleiben muss. So zeigen manche Wandgemälde Hirten, die wohl mit magischen Gesten Krokodile von ihren Herden fernzuhalten versuchen. Doch wenn komplexe Rezitationen und Handlungsfolgen der schriftlichen Fixierung bedurften, geschah dies sicherlich eher in einem Tempel oder am Königshof. Wahrscheinlich hatte der Verstorbene in einem solchen Rahmen seine Ausbildung erhalten. Insbesondere die Verfluchung eines Rivalen vor Gericht hätte wohl den Rahmen üblicher Tempeldienstleistungen gesprengt, doch ob es im 18. Jahrhundert v. Chr. auch freiberufliche Magier gab, wissen wir nicht.

Experten können in den Ramesseum-Papyri verschiedene Handschriften unterscheiden und zeitlich einordnen. Demnach lagen zwischen der Abfassung der ältesten und der jüngsten bis zu 100 Jahre. Vielleicht gehörte der Grabinhaber also zu einer Ritualistendynastie und die Bibliothek war das Werk mehrerer Generationen, möglicherweise waren manche Handschriften schlicht zugekauft worden – auch das kann nicht erwiesen werden.

Bleibt schließlich die Frage, warum man dem Verstorbenen keine Bibliothek an die Seite gab, die ihm in der Art der berühmten »Totenbücher« magische Hilfen für seine jenseitige Existenz bot. Der Vergleich mit anderen Gräbern der gleichen Epoche offenbart jedoch, dass jenseitsspezifische Grabbeigaben damals wohl nicht dem Zeitgeist entsprachen. Auch andernorts legte man größeren Wert darauf, den Toten Objekte mitzugeben, die sie zu Lebzeiten benutzt hatten. Vermutlich sollten diese für alle Ewigkeit anzeigen, welche Rolle eine Person in der Gesellschaft innegehabt hatte. Mochte der Verstorbene, über dessen Grabschacht Ramses II. seinen Tempel bauen ließ, auch nicht zu den wohlhabendsten Einwohnern Thebens gehört haben, so beherrschte er doch zu Lebzeiten mächtige Zauber und kannte selbst die Rituale am Pharaonenhof. Daran sollten seine Bücher im Jenseits erinnern. ◀

QUELLEN

Barns, J. W. B.: Five Ramesseum Papyri. Oxford University Press, 1956

Gardiner, A. H.: The Ramesseum Papyri. Plates. Oxford University Press, 1955

Parkinson, R. B.: Reading Ancient Egyptian Poetry among Other Histories. Wiley-Blackwell, Chichester, Malden 2009

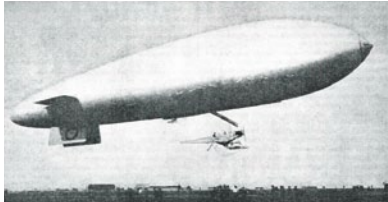
Sethe, K.: Dramatische Texte zu altägyptischen Mysterienspielen. Hinrichs, Leipzig 1928

WEBLINK

Die Ramesseum-Papyri im Netz: www.britishmuseum.org/research/publications/online_research_catalogues/rp/the_ramesseum_papyri.aspx

1916

EIN NEUARTIGES LUFTSCHIFF



Militärluftschiff für Hafenverteidigung und U-Boot-Jagd.

»Ein neuer britischer Luftschiffotyp ist in erster Linie für die Aufklärung gedacht mit wenig Ausrüstung, kleinem Aktionsradius und großer Geschwindigkeit. Als Besonderheit tritt die Verwen-

dung des Armeeflugzeuges an Stelle der Gondel auf. So wird der Luftwiderstand auf ein Minimum herabgedrückt. Eine Neuheit ist ferner der Schlauch, der hinter die Luftschraube führt. Vom Führersitz aus kann er geöffnet werden, so daß durch den Propellerwind Luft hineingepreßt wird. Diese wird in den Kompensationsballon geleitet, dessen Füllung und Leerung zum Ausgleich gewisser Störungen in der Bewegung dient, die durch Temperaturwechsel und Luftdruckschwankungen verursacht werden. Diese britischen Luftschiffe haben sich bei der Hafenverteidigung und Küstenbewachung bewährt.« *Prometheus 1408, S. 47*

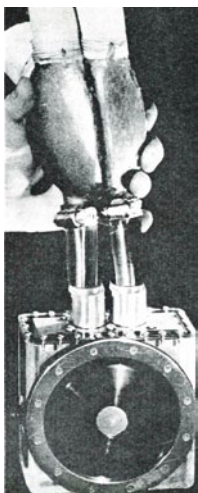
DIE WAHREN URSACHEN DER EISZEIT

»Es ist mehrfach versucht worden, die Entstehung der Eiszeit auf kosmische Erscheinungen zurückzuführen, also auf ein Nachlassen der Wärmeenergie der Sonne, oder auf eine Polverschiebung. Dr. W. Eckardt ist der Ansicht, daß die Ursachen in rein terrestrischen Verhältnissen zu suchen seien. Die großen Eiszeiten traten nach gebirgsbildenden Prozessen ein. Zu Ende der Tertiärzeit erfolgte die Auffaltung der Alpen, der skandinavischen und nordamerikanischen Gebirge. Es wurden also große Kontinentalmassen über die Schneegrenze emporgehoben, was eine Vergletscherung ausgedehnter Gebiete zur Folge hatte. Diese erzeugte ein feuchteres und kühleres Klima, das seinerseits Gletscherentwicklung begünstigte.« *Prometheus 1406, S. 16*

VÖGEL AN DER FRONT

»Mit Genehmigung der französischen Heeresverwaltung hat sich der Ornithologe Louis Rosseau an die Front begeben und festgestellt, daß es meist nur Raben sind, welche da, wo Gefallene liegen, in großer Anzahl leben. Ferner fand er auf Zweigen, welche das Granatfeuer gelassen hat, Nester vom Kuckuck, von Drossel und Elster. In der Nähe der Schützengräben pickten Tauben Brosamen auf, Stare suchten Material zum Bau ihrer Nester. Wie Kriegsberichterstatte festgestellt haben, lassen Vögel Unempfindlichkeit gegen Schlachtenlärm beobachten.« *Die Welt der Technik 20, S. 14*

1966



Kunsthertz made in Indianapolis.

KÜNSTLICHES HERZ

»Es gibt heute ein künstliches Herz mit einem Gewicht von 1,8 kg und 12 cm Durchmesser, das den ganzen Brustkorb eines Kalbes ausfüllt. Das Kalb konnte damit 18 Stunden lang am Leben erhalten werden. Der an der Universität von Indiana entwickelte Apparat wird durch einen winzigen Elektromotor angetrieben, der in der Bauchhöhle liegt und Blut in zwei Kammern pumpt, die an die verbliebenen Vorhöfe des entfernten Herzens angeschlossen werden. Ein elektronisches Überwachungssystem korrigiert Druckunterschiede zwischen beiden künstlichen Ventrikeln.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 10, S. 425–426*

ERDE – ALL UND VICE VERSA

»Es gibt viele Beispiele dafür, daß astronomische Beobachtungen die Entwicklung von Ideen beeinflusst haben, die das Innere unseres eigenen Planeten betreffen. So führten Unregelmäßigkeiten in der Bewegung von Mond, Sonne, Venus und Merkur zur Entdeckung, daß die Erde nicht gleichmäßig rotiert. Die Unregelmäßigkeiten konnten erklärt werden mit Wechselwirkungen zwischen dem flüssigen Erdkern und dem festen Erdmantel. Ähnliche Ergebnisse erhält man neuerdings bei der Erforschung des Planetensystems. Ein flüssiger Kern ist notwendig für die Bildung von Magnetfeldern in Monden und Planeten. Die Messungen der Mariner- und Lunasonden bestätigten nun, daß der Mars kein Magnetfeld, d. h. wahrscheinlich keinen flüssigen Kern besitzt.« *Die Umschau 19, S. 645*

WERTVOLLER ABFALL

»Mit Bakterien, die Säuren produzieren, versuchen Wissenschaftler des US-Bergbauamtes Metalle aus Schlacke, minderwertigen Erzen oder Flüssigkeiten zu gewinnen, die normalerweise nur als Abfall betrachtet werden. In Kupferhütten wird dieses Verfahren sogar bereits im technischen Umfang angewandt.« *Neuheiten und Erfindungen 363, S. 182*

Wissen, das gut für Sie ist!

Entdecken Sie die Vielfalt von ZEIT WISSEN! Erfahren Sie in jeder Ausgabe Neues aus Gesundheit, Psychologie, Forschung und Gesellschaft: faszinierend, lebendig und alltagsnah.

Fordern Sie jetzt Ihre Gratisausgabe an!

Einfach Code einlösen unter:

 www.zeit.de/zw-gutschein



Jetzt gratis testen!

Gutschein-Code:
ZW944SPEK

Abnehmen
Sprachen lernen
Sport machen
Die Wissenschaft
der Motivation

ZEIT WISSEN

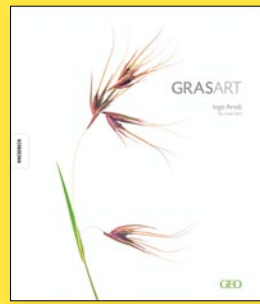
REZENSIONEN

Das Grasland der patagonischen Steppe ist Lebensraum für viele Tierarten, sogar Pumas.





BEIDE FOTOS: INGO ARNDT, AUS INGO ARNDT UND JÜRGEN TAUTZ: GRASART, MIT FOTOL. GEN. DES KNESEBECK-VERLAGS, MÜNCHEN



Ingo Arndt, Jürgen Tautz
GRASART
 Knesebeck, München 2016
 256 S., € 49,95

BIOLOGIE DAS GRAS DER ERDE

Süßgräser sind filigran, formenreich und bilden den Lebensraum unzähliger Lebewesen.

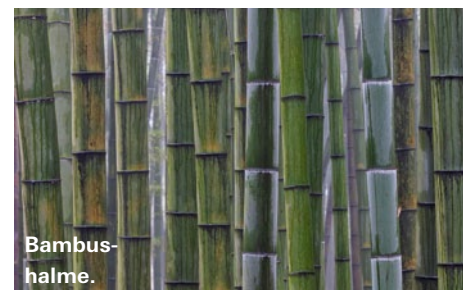
► Bambus ist Gras? Das fragt sich vielleicht der eine oder andere, der den vorliegenden Bildband aufschlägt und dabei ein ganzes Kapitel über diese Gewächse entdeckt. Bambus zählt tatsächlich zu den Süßgräsern, jenen krautigen Pflanzen, um die sich das Buch dreht. Das Besondere an dem Werk: Es bietet nicht nur wunderschöne, detailreiche Aufnahmen von Gräsern, sondern auch herausragende Fotos von Bewohnern verschiedener Graslandschaften.

Die Bilder des Fotografen Ingo Arndt sind nach den Kategorien Pampa, Prärie, Steppe und Savanne geordnet. Wer Probleme damit hat, diese Landschaftsformen auseinanderzuhalten, kann hier etwas lernen. Zudem finden sich Kapitel über die Everglades, über Schilf und eben über Bambus.

Der Bildband lässt sich auf zweierlei Weise lesen. Zum einen lohnt es, die Anfangstexte jedes Kapitels einfach zu übergehen und nur die Bilder auf sich wirken zu lassen. Diese sind ausdrucksstark, fesselnd und bedecken mitunter eine komplette Doppelseite, was bei dem Buchformat von 27 mal 32 Zentimetern sehr groß ist. Dort stören dann keine Bildunterschriften (sie sind auf die benachbarten Seiten ausgelagert) und noch nicht einmal Seitenzahlen den optischen Eindruck. Zu sehen ist beispielsweise ein rotbraunes Auge inmitten runzlicher, grauschwarzer Haut mit einem seitlich abstehenden, gekerbten Horn. Erst nach einer Weile erschließt sich, dass es der Kopf eines Kaffernbüffels ist – eines Bewohners der afrikanischen Grassavanne.

Daneben gibt es Fotostrecken von bis zu vier kleineren Aufnahmen pro Doppelseite. Zum Beispiel von zwei Giraffen, die ihre Hälse verschränken und die Köpfe aneinanderschmiegen. Es sieht aus, als würden die Tiere kuscheln; die Bildunterschrift belehrt den Leser aber eines Besseren: Hier spielt sich ein Kampf um die Rangordnung ab.

Schon diese kurzen Bildbeschreibungen machen das Buch zur runden Sache. Noch mehr erfährt, wer zum anderen die Texte des



Bambus-
halme.

Verhaltensforschers, Soziobiologen und Bienenexperten Jürgen Tautz liest. Dieser liefert lebhaft und unterhaltsame Hintergrundbeschreibungen der jeweiligen Graslandschaften und ihrer Bewohner. Dabei gelingt es ihm, auf fast alle Lebewesen einzugehen, die auf den nachfolgenden Fotos zu sehen sind, ohne dass der Text konstruiert wirkt.

Der Band besticht außerdem mit seinen geradezu künstlerischen Abbildungen verschiedenster Gräser. Naturaufnahmen wechseln sich ab mit Studiofotos von filigranen und farbenfrohen Gewächsen vor weißem Hintergrund. Das alles ist sehr gelungen und optisch ansprechend präsentiert, woran Ingo Arndts Frau Silke ihren Anteil haben dürfte, die als ausgebildete Grafikdesignerin die Gestaltung übernahm. »GrasArt« spricht sowohl das Auge als auch den Geist an.

Miriam Plappert ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Tübingen.

PHYSIK WIE ENTSTEHEN VORHER UND NACHHER?

Die Zeit »fließt«, während die Entropie abgeschlossener Systeme zunimmt. Dennoch sind Zeit und Entropie nicht dasselbe: eine Polemik gegen ihre Gleichsetzung.

Der ungeheure Erfolg von Stephen Hawking »Eine kurze Geschichte der Zeit« (1988) beruhte darauf, dass das Buch faszinierende Fragen der modernen Naturerklärung in scheinbar

verständlicher Weise ansprach. Hawking war als Koryphäe im Grenzbereich von Quantenphysik, allgemeiner Relativitätstheorie und Kosmologie ausgewiesen, und der lässige Plauderton seines Buchs erweckte den Eindruck, alle darin angesprochenen Probleme seien geklärt oder stünden zumindest kurz vor der endgültigen Lösung. Dagegen erhebt Arieh Ben-Naim, Professor für physikalische Chemie an der Hebräischen Universität von Jerusalem, im vorliegenden (englischsprachigen) Werk entschiedenen Protest.

Ben-Naims Spezialgebiet ist die Entropie, ein Maß für die Zahl der mikroskopischen Realisierungsmöglichkeiten eines bestimmten makroskopischen Zustands. Mit diesem zentralen Begriff der Thermodynamik berechnet ein physikalischer Chemiker routinemäßig das Systemverhalten bei Stoffumwandlungen. Der Autor, der dem Thema mehrere Bücher gewidmet hat, ist

geradezu allergisch gegen abgehobene Spekulationen über die Entropie – beispielsweise, dass sie auf geheimnisvolle Weise mit dem Zeitpfeil identisch sei, wie Hawking und andere behaupteten.

Zweifellos trifft der zweite Hauptsatz der Thermodynamik eine Aussage über zeitliche Entwicklungen. Ihm zufolge kann die Entropie in einem abgeschlossenen System niemals ab-, sondern immer nur gleich bleiben oder zunehmen. Aber das bedeute noch lange nicht, dass die Entropie definiere, was Zeit sei, oder gar mit ihr identisch sei, schreibt der Autor. Für solche Spekulationen hat er nur Spott übrig, was übrigens den Unterhaltungswert seines Buchs erhöht.

Den Entropiebegriff leitet Ben-Naim überraschenderweise aus dem Informationsmaß her, das der amerikanische Mathematiker und Elektrotechniker Claude Shannon (1916–2001) entwickelt hat, obwohl die Entropie als Teil der Wärmelehre dem Informationsbegriff der Nachrichtentechnik um viele Jahre vorausging. Ich vermute, mit dieser historischen Verdrehung möchte der Autor möglichst viel Abstand zwischen die physikalischen Begriffe Entropie und Zeitpfeil legen. Er behauptet immer wieder, die Entropie sei ein völlig zeitloser, nur von den Randbedingungen des Systems abhängiger Begriff; zeitliche Veränderung billigt er allein dem shannonschen Informationsmaß zu. Hier allerdings scheint er mir im Eifer der Polemik die Dinge auf den Kopf zu stellen.

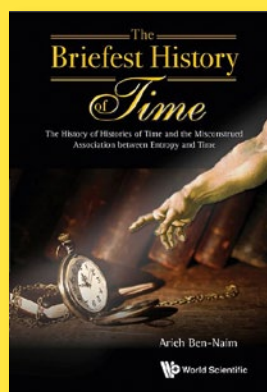
Der Zusammenhang von Entropie und Information ist

nämlich mindestens so heikel wie der zwischen Entropie und Zeit. Shannons Formel für das Informationsmaß sieht zwar äußerlich der vom österreichischen Physiker Ludwig Boltzmann (1844–1906) aufgestellten Entropieformel sehr ähnlich, besagt aber in gewissem Sinn das Gegenteil, was in dem (selten hervorgehobenen) Minuszeichen der Shannon-Formel zum Ausdruck kommt. Salopp gesagt ist Entropie ein Maß für die Unordnung eines Systems, deren Anwachsen mit der Zeit zunehmend wahrscheinlicher wird, während das Shannon-Maß den unwahrscheinlich geordneten und an sich zeitlosen Informationsgehalt einer Nachricht angibt.

Ben-Naim polemisiert heftig gegen jede Veranschaulichung von Entropie als »Unordnungsparameter«, die bei richtiger Verwendung aber durchaus zu rechtfertigen ist. Wie bei der Gleichsetzung von Entropie und Zeit hat er sicher Recht damit, jeden echten Missbrauch anzuprangern, aber ich meine: Vergleiche dürfen hinken.

Wie heißt es so schön am Ende des Films »Manche mögen's heiß«: Kein Mensch ist vollkommen. Weder Hawking noch Ben-Naim haben alle Rätsel gelöst, die sich um Zeit, Entropie und Information ranken. Aber als Warnung vor allzu beliebigen Gedankenspielen mit physikalischen Grundbegriffen erfüllt Ben-Naims Buch seinen Zweck – und Spaß macht die Lektüre obendrein.

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



Arieh Ben-Naim
THE BRIEFEST HISTORY OF TIME
The History of Histories of Time and the Misconstrued Association between Entropy and Time
World Scientific, Singapur 2016
244 S., € 19,95



Amrei Wittwer und Gerd Folkers
SCHMERZ
Innenansichten eines Patienten
und was die Wissenschaft dazu
sagt
Hirzel, Stuttgart 2016
216 S., € 34,-

MEDIZIN NEUES ÜBER DEN SCHMERZ

Zwei Pharmazeuten beleuchten, wie körperliche Pein entsteht und wie man sie behandeln kann.

▶ Rot und alarmierend, passend zum Thema Schmerz, sticht der Umschlag dieses Buchs ins Auge. Amrei Wittwer und Gerd Folkers präsentieren darin neueste einschlägige Forschungsergebnisse auf wissenschaftsnahe, aber gut verständliche Weise. Sie räumen mit manchem Vorurteil auf, das einer erfolgreichen Schmerztherapie im Weg stehen kann. Den

roten Faden des Buchs liefert eine fiktive Patientengeschichte voller Missgeschicke, die skurril und fast schon gruselig ist.

Amrei Wittwer hat Pharmazie studiert, sich jahrelang mit Schmerzforschung befasst und ist am schweizerischen Collegium Helveticum für interdisziplinäre Forschungsprojekte und Wissenschaftskommunikation verantwortlich. Gerd Folkers, ebenfalls Pharmazeut, hat diese Einrichtung mehr als elf Jahre lang geleitet. Seit 2012 gehört er dem schweizerischen Wissenschafts- und Innovationsrat (SWIR) an. Die Autoren haben das erklärte Ziel, Licht in jenes Halbwissen zu bringen, das sich um den Schmerz rankt. Sie möchten

ihre Leser so in die Lage versetzen, dem Phänomen mit fundierten Kenntnissen statt mit vagen Annahmen und Vorurteilen zu begegnen.

Zunächst erklären die Forscher, wie Schmerz entsteht. Dabei, schreiben sie, spielen nicht nur Reize an Rezeptoren und ihre Weiterleitung ins Zentralnervensystem eine Rolle, sondern auch Hirnregionen, die dem eintreffenden Signal beispielsweise eine emotionale Bedeutung zuschreiben und es mit Erinnerungen verknüpfen. Diese Areale mit samt ihren Vernetzungen bilden die so genannte Schmerzmatrix – das zentrale Element der (individuell sehr verschiedenen Schmerzverarbeitung. Hier entfalten

Spektrum
der Wissenschaft

SCHREIBWERKSTATT

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

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

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

Telefon: 06221 9126-743 | service@spektrum.de
spektrum.de/schreibwerkstatt

REZENSIONEN

Methoden wie Biofeedback, Verhaltens oder Entspannungstherapie beim Behandeln chronischer Leiden ihre Wirkung.

Die verbreitete Annahme, Schmerzen auszuhalten härte ab, entlarven die Autoren als Mythos und widerlegen sie gleich zu Beginn des Buchs. Wie das gesamte Gehirn sei auch das schmerzverarbeitende System lernfähig. Jede akute Qual könne deshalb Schmerzrezeptoren, Leitungsbahnen und die Schmerzmatrix empfindlicher machen (»sensitivieren«) – mit dem Ergebnis, dass Nerven auch ohne angemessenen Reiz zu feuern beginnen. Eine solche Sensitivierung könne bereits nach 72-stündigem Schmerzempfinden einsetzen. Schmerzen einfach zu ertragen, berge deshalb die Gefahr chronischer Qual. Die Mechanismen, die dem zu Grunde liegen, ließen sich allerdings auch nutzen, um das Gehirn wieder umzuschulen.

Wittwer und Folkers entlarven noch zahlreiche weitere Mythen als Irrtümer. Beispielsweise den, ein Versagen der Schmerztherapie werde irgendwie vom Patienten verschuldet. Oder jenen, wonach Tiere zwar Schmerzreflexe haben, aber Qualen nicht bewusst empfinden. Auch der These, Frauen könnten mehr körperliche Pein aushalten, da

sie Kinder gebären, widersprechen die Autoren, gestützt von zahlreichen Literaturverweisen. Das Gegenteil treffe zu: Frauen seien meist deutlich schmerzempfindlicher. Dass man landläufig anderes annimmt, könnte ganz unvermutete Gründe haben, wie eine Studie gezeigt hat. Demnach nehmen Ärzte weibliche Schmerzpatienten oft weniger ernst als männliche, denn Frauen bemühen sich üblicherweise stärker um ein gepflegtes Äußeres als Männer und erwecken deshalb seltener den Eindruck echter Qual. Deswegen bekommen sie im Leidensfall häufig auch weniger Schmerzmittel verschrieben.

In einem »Kleinen Compendium der Schmerzmittel« erläutern die Autoren zahlreiche Möglichkeiten, dem Schmerz medikamentös zu begegnen. Opiode gehören dabei zu den potentesten derzeit bekannten Arzneistoffen. Wittwer und Folkers widerlegen in dem Zusammenhang den Mythos, wonach diesen Substanzen eine große Suchtgefahr innewohnt. Würden der Blutspiegel durch genau abgestimmte Medikamenteneinnahme konstant gehalten und kurzzeitige Spitzen der Wirkstoffkonzentration vermieden, sei das Abhängigkeitsrisiko eher gering. Die euphorische Stimmung, die mit dem

Gebrauch von Opioiden einhergehe und oft bereits als Sucht gewertet werde, sei in der Therapie eigentlich erwünscht, da sie die Schmerzempfindung dämpfe. Auch Cannabis werde zu Unrecht stigmatisiert. Aus Angst vor Abhängigkeit, beklagen die Pharmazeuten, würden viele Patienten nicht ausreichend behandelt – eine »Epidemie der unterversorgten Schmerzen«.

Wittwer und Folkers werfen auch einen Blick in die Vergangenheit. Lange Zeit spielten demnach Spiritualität und Religion eine große Rolle in der Schmerzbekämpfung. Um die Pein zu überwinden ebenso wie das quälende Bewusstsein um die Verletzlichkeit und Endlichkeit des Körpers, entwarfen die Menschen religiöse und geistige Gegenwelten. Die Autoren beleuchten entsprechende spirituelle Praktiken, Votiv- und Reliquienkulte sowie die Opfermystik. Dabei machen sie deutlich, dass sie Schmerzen in keinem Fall für gerechtfertigt halten, auch nicht als Strafe für schlimme Taten. Schmerz sei kein »gottgewollter Zustand« und schon gar keiner, der den Menschen in irgendeiner Weise verbessere.

Das Buch ist auf dem aktuellen Stand der Medizin und sollte für jeden praktizierenden Arzt, der häufig mit Schmerzpatienten zu tun hat, zur Standardlektüre gehören. Aber auch Nichtmediziner mit naturwissenschaftlichem Interesse werden von dem Buch profitieren.

Tanja Neuvians hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg bei Heidelberg.



QUOD ERAT KNOBELANDUM

Themen, Aufgaben und Lösungen des Schülerzirkels Mathematik der Universität Regensburg
Springer Spektrum,
Berlin und Heidelberg 2016
296 S., € 19,99

MATHEMATIK HERAUS- FORDERNDES FÜR SCHÜLER

Von Algebra bis Schlussverfahren hält dieses Werk viele Knobelaufgaben für Jugendliche bereit.

Seit dem Schuljahr 2012/13 führt die Fakultät für Mathematik an der Universität Regensburg einen Schülerzirkel Mathematik durch. Ziel ist es, Schüler ab der 7. Klasse für das Fach zu begeistern. Das versucht man zu erreichen, indem man Stoff behandelt, der möglichst unabhängig vom Schulcurriculum ist. Die Schüler bekommen jährlich fünf Themenblätter angeboten, die je in einen mathematischen Teilbereich einführen und zugehörige Aufgaben stellen. Ein Mitarbeiterteam korrigiert die eingesandten Lösungen und vergibt Preise. Workshops runden das Ganze ab.



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Mehr Rezensionen finden Sie unter
spektrum.de/rezensionen

Nach den ersten drei Jahren Schülerzirkel ist aus den gesammelten Materialien nun das vorliegende Buch entstanden. Zudem hat man die Sammlung ergänzt – vor allem die Aufgabenlösungen, die jetzt vermehrt auf typische Schwierigkeiten und Fehler eingehen. Zu den Verfassern zählen neben den Mathematikprofessoren Clara Löh und Stefan Krauss auch studentische Hilfskräfte.

Zunächst gehen die Autoren auf den Aufbau des Werks und die Vorgehensweise im Schülerzirkel ein. Zum Thema Schachbrettmuster und andere Färbungen präsentieren sie exemplarische Aufgaben mit ausführlichen Lösungen. Anhand dieses Beispiels lassen sich die folgenden »Auf-

wärmübungen« vergleichsweise leicht bearbeiten. Zur Abrundung folgen Aufgaben, deren Schwierigkeitsgrad mit Sternchen gekennzeichnet ist. Geneigte Leser bekommen in dem Zusammenhang verschiedene Hinweise: Wie geht man an ein Problem heran? Was ist ein Beweis? Wie schreibt man eine Lösung auf?

Der zweite Teil des Werks befasst sich mit den 15 Themen der ersten drei Jahre des Schülerzirkels. Diese lassen sich nahezu unabhängig voneinander durcharbeiten, so dass man an weitgehend beliebiger Stelle einsteigen kann. Es geht hierbei um diskrete Mathematik (Graphen und Kombinatorik), Algebra (Teilbarkeit, Primzahlen,

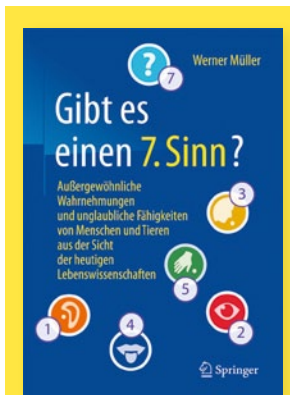
Strukturen von Zahlbereichen), Geometrie (Längen, Winkel, Flächen, Körper), Logik und Mengenlehre (Aussagen, Formalisierung, Schlussverfahren, Abzählbarkeit) sowie Analysis (Folgen und Reihen). Der Einstieg in ein Thema erfolgt stets mit einer Knobelaufgabe, für deren Lösung man das nötige Rüstzeug – Begriffe, Methoden, wichtige Sätze und so weiter – zur Verfügung gestellt bekommt.

Die Texte sind durchweg klar und verständlich formuliert und werden damit dem Anspruch gerecht, jüngere Schüler anzusprechen. Hilfreich sind auch die wenigen, aber thematisch passenden Literaturhinweise, die zur weiteren Lektüre anregen. Zudem finden sich

nützliche Verweise auf Wikipedia-Artikel. Der hintere Teil des Werks präsentiert die Lösungen mit ausführlichen Kommentaren auf fast 90 Seiten. Außerdem gibt es hier ein Nachwort sowie ein umfangreiches Stichwortverzeichnis.

»Quod erat knobelandum« ist zwar vor allem für Arbeitsgemeinschaften gedacht, eignet sich aber auch für die individuelle Lektüre mathematisch interessierter Schüler. Man kann nur hoffen, dass die Lehrerinnen und Lehrer das originelle Buch gebührend zur Kenntnis nehmen, um es in ihren Klassen zu empfehlen.

Heinz Klaus Strick ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.



Werner Müller
GIBT ES EINEN 7. SINN?
Außergewöhnliche Wahrnehmungen und unglaubliche Fähigkeiten von Menschen und Tieren aus der Sicht der heutigen Lebenswissenschaften
Springer, Heidelberg 2016
312 S., € 14,99

SINNESBIOLOGIE DEM ÜBERSINNLICHEN AUF DER SPUR

Biologe Werner Müller hinterfragt angeblich übernatürliche Wahrnehmungen.

► Zukunftsvisionen, Nahtoderfahrungen, Haustiere, die telepathisch mit ihren Haltern in Kontakt stehen: Die Vorstellung von übersinnlichen Wahrnehmungen hält sich hartnäckig. Immer wieder behaupten Esoteriker, es gebe diese Phänomene – und berufen sich dabei auf anekdotische Fallgeschichten. Es fehlen aber reproduzierbare Belege, stellt Werner Müller klar, emeritierter Professor an der Fakultät für Biowissenschaften der Universität Heidelberg. Nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten hinterfragt er unter anderem die Versuche von Parapsychologen, Übersinnliches experimentell nachzuweisen.

In zwölf Kapiteln legt Müller dar, warum wir paranormale Ansätze nicht bemühen müssen. Die meisten verblüffenden Wahrnehmungsfähigkeiten, zeigt er, lassen sich schon mit heutigen empirischen Erkenntnissen erklären. Ein Hund beispielsweise, der die Diabeteserkrankung seines Herrchens bemerkt, schafft das mit seinem normalen Geruchssinn. Und wahrscheinlich, führt der Autor weiter aus, würden künftig noch etliche weitere Mechanismen der Sinneswahrnehmung experimentell zugänglich, die bislang nicht einmal entdeckt seien. Um sie zu untersuchen, müssten Rezeptoren unverletzt mit Messgeräten analysiert werden, während Mensch oder

Tier bei vollem Bewusstsein sind – was sich bisher schwer umsetzen ließ, aber mit neuen Techniken zunehmend besser möglich ist.

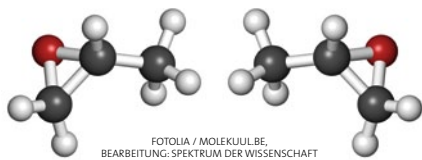
Stellenweise irritiert die Fülle an unterschiedlichen Themen, die der Autor anreißt. Unterm Strich wirkt der Band jedoch fundiert recherchiert und ist amüsant geschrieben. Ein lesenswertes Werk – nicht nur für Leser, die dem 7. Sinn gegenüber skeptisch eingestellt sind. Corinna Hartmann

ZUSAMMENHANG MIT LEBEN

Nahe dem Michstraßenzentrum haben Forscher Propylenoxid in zwei spiegelbildlichen Formen nachgewiesen. (»Chirale Moleküle im All«, Spektrogramm, *Spektrum* August 2016, S. 7)

Manfred Bühner, Freiburg im Breisgau: Was, bitte schön, haben chirale Moleküle im All mit der Entstehung des Lebens auf der Erde zu tun? Nichts, aus zwei Gründen:

1. Die frühe Erde vor vier Milliarden Jahren hatte alle Chemie, die für das Leben erforderlich war, da brauchte man keine Lieferungen aus dem All.
2. Natürlich spielen chirale Moleküle in der Biochemie eine große Rolle, aber die Chiralität ist bedingt durch die chemische Struktur der Moleküle, ihre Verwendung hat nichts damit zu tun. Propylenoxid kommt in der Biochemie



FOTOLIA / MOLEKULUBE,
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Propylenoxid existiert in zwei Formen
(grau: Kohlenstoff,
weiß: Wasserstoff, rot: Sauerstoff).

sowieso nicht vor, und wenn es sich umlagert, entsteht entweder Azeton oder Propionaldehyd, beides nichtchirale Substanzen. Chiralität ist in der organischen Chemie ein Allerweltsphänomen, die allermeisten Substanzen sind chiral außer den ganz einfachen. Chiralität tritt immer dann auf, wenn ein Molekül keine Spiegelebene aufweist, das heißt, wenn ein Kohlenstoffatom an vier verschiedene Liganden bindet; und das kommt bei großen Molekülen oft vor.

ELEKTROLYTE BESTIMMEN DIE NUTZBARKEIT

Redox-Flow-Akkus können große Mengen an Elektrizität speichern, diese rasch wieder zur Verfügung stellen und dabei helfen, Schwankungen in der Stromversorgung auszugleichen. (»Die Batterie der Zukunft«, *Spektrum* Juni 2016, S. 74)

Michael Jungnickl, Neunkirchen am Brand: Die französische Chemiefirma Dupont hatte bereits für heiße Elektrolyte (400 Grad Celsius) zwei Versuchsanlagen errichtet: vor rund 15 Jahren mit 500 MW (15 Minuten) und Natriumbromid in Großbritannien, und vor zirka zehn Jahren mit 200 MW und Natriumsulfid in Japan. Eine kleinere Anlage mit Natriumbromid in Colorado/USA war geplant, um dort die Energie von Windrädern zu speichern und als Spitzenlast zu verkaufen. Die Anlagen waren funktionsfähig. Aber auf

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an leserbriefe@spektrum.de. Oder kommentieren Sie im Internet auf Spektrum.de direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht.

Grund der Elektrolyte gab es zwei Probleme: Brom ist giftig; unter Zuführung von Wasser entsteht giftiges Bromgas. Daher wurde die Anlage in Colorado nicht mehr gebaut, die Bevölkerung war strikt dagegen. In der Anlage in Japan mit Schwefel brannte es dreimal. Die dortigen Stadtwerke stellten daher den Betrieb ein.

ERFINDERGEIST UND KOOPERATION

Kooperationsfähigkeit und das Benutzen von Distanzwaffen führten den modernen Menschen zum Erfolg, ist der Archäologe Curtis W. Marean überzeugt. (»Der Siegeszug des *Homo sapiens*«, *Spektrum* Juni 2016, S. 48)

Adalbert Rabich, Dülmen: Auch die hier vorgestellte Ausbreitungstheorie geht von Annahmen aus, darunter [die Existenz] bestimmter Veranlagungsgene [für Kooperation, Territorialität und Waffentechnologie], die aber nicht die einzige Voraussetzung für eine »Überlegenheit« zu sein scheinen. Daneben tritt wenigstens noch die Kunst, Erfahrungswissen und Umsetzungserfolge in der jeweiligen Gruppe zu speichern. Maßgebend sind wohl das dortige erfinderische Individuum und das Aufeinander-angewiesen-Sein. Die Erklärung von Hass auf ein Anderssein ist wenig überzeugend, schon gar nicht erschöpfend. Das Durchspielen mit mathematischen Modellen kann nur eine Möglichkeit offenbaren; man weiß ohnehin nicht, ob die Kooperationsfähigkeit und -bereitschaft nicht eher der jeweiligen Erwartung auf eine Erfolgswahrscheinlichkeit im Überlebenskampf zu verdanken ist.



Mit den damals fortschrittlichsten Waffen – und nicht zuletzt dank seines besonderen Gemeinschaftssinns – eroberte der moderne Mensch fast alle Weltregionen und übertrumpfte archaische Menschenarten.



Der Hintergrund

Frauen sind in wissenschaftlichen Führungspositionen unterrepräsentiert. Es fehlen jedoch passende Instrumente, um schnell sehr gute und geeignete Wissenschaftlerinnen zu finden.

Das Projekt

AcademiaNet ist eine Datenbank mit Profilen von über 2100 exzellenten Forscherinnen aus allen Fachdisziplinen.

Unser Ziel

Wir wollen Ihnen mit unserem Rechercheportal die Besetzung von Führungspositionen und -gremien mit Wissenschaftlerinnen erleichtern.

Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature

Sie wollen mehr erfahren?

www.academia-net.de

futur III Supervision

Virtuelle Beziehungen haben ihre Tücken. **Eine Kurzgeschichte von Norbert Stöbe**

Seine psychotherapeutische Praxis hatte Nestor Krieger dank starkem Engagement und unermüdlichem Fleiß erfolgreich etabliert – sogar sehr erfolgreich. Seit Jahren schon war sein Terminkalender zum Brechen voll, die Patienten mussten sich mit einer langen Warteliste abfinden. So hatte er kaum gemerkt, wie einsam er geworden war. Persönliche Beziehungen zu anderen Menschen wurden mit der Zeit zur Ausnahme, ja zum Störfall, der lediglich seine berufliche Leistungsfähigkeit beeinträchtigte.

Zunächst war ihm kein Mangel aufgefallen. Sexuelle Flauten lassen sich ja mittels 3-D-Brille und manueller Entspannung problemlos überbrücken. Seinen Job erledigte Dr. Krieger so souverän wie eh und je. Alles verlief in bekannten, bewährten Bahnen. Deshalb traf ihn die Krise so vollkommen unvorbereitet.

Denn plötzlich litt er an Schlafstörungen. In der Therapie war er unkonzentriert; die selbstverliebten Erzählungen seiner Patienten langweilten ihn. Er ging ziellos im Park spazieren. Alles sehr beunruhigend! Und schuld daran war Herr Winkler.

Auf den ersten Blick wirkte nichts an Leo Winkler ungewöhnlich: ein etwas übergewichtiger Büromensch Mitte 40, mit blassem Teint und Kurzhaarschnitt. Das einzig Modische war die getönte Virtual-Reality-Brille, die seine Augen umschloss.

»Bitte nehmen Sie doch Platz«, sagte Dr. Krieger und zeigte auf den Stuhl vor dem Schreibtisch.

»Hätten Sie vielleicht noch einen Stuhl?«, fragte Winkler verlegen.

»Wie bitte?«, erwiderte Krieger.

»Wir sind zu zweit.«

»Natürlich, aber gewiss«, sagte Krieger verständnisvoll. Er nahm hinter dem Schreibtisch Platz, bat seine Sekretärin, einen zweiten Besucherstuhl hereinzubringen, und wartete, bis Winkler sich gesetzt hatte. Der andere Stuhl blieb leer. Natürlich.

»Wie kann ich Ihnen helfen?«, fragte Krieger und warf einen Blick auf die in die Schreibtischplatte eingebaute Hologrammuhr.

»Also wir ... Auf Ihrer Website steht, Sie machen auch Paartherapie.«

»Das trifft zu«, nickte Krieger.

Winkler rang nach Worten. Offenbar war er es nicht gewohnt, über seine Probleme zu sprechen. Seine Stirn glänzte, er räusperte sich und scharrte mit den Füßen. Endlich stammelte er: »Es ist kompliziert!«

Krieger unterdrückte ein Stöhnen. Die sprachlichen Stereotype seiner Patienten bereiteten ihm nach all den Jahren Praxis fast körperliche Schmerzen. Gemildert wurde die Qual diesmal durch die Aussicht auf einen ungewöhnlichen Fall. Echte Persönlichkeitspaltung, das war neu.

»Bitte erzählen Sie mir von Ihrer Beziehung«, sagte er.

»Es war einfach perfekt! Ein wahr gewordener Traum! Wir hatten Spaß, wir hatten Sex, wir haben alles miteinander geteilt! Aber jetzt ... ich will sie nicht verlieren!«

»Lassen Sie uns Ihre, äh, Problematik ein wenig vertiefen«, erwiderte Krieger mit Blick auf den leeren Stuhl. »Oft sind es grundlegende Erlebnisse der frühen Kindheit, die das Liebesleben beeinträchtigen. Außerdem ist es bei einer Paartherapie unerlässlich, dass beide daran teilnehmen.«

Winkler riss die Augen auf, schlug sich an die Stirn und griff dann in eine Tasche seines Overalls. Er zog eine zweite VR-Brille hervor, klappte

sie auseinander und schob sie auffordernd über den Schreibtisch. Nach kurzem Zögern setzte Krieger die Brille auf und schaltete sie ein.

Sein Zimmer sah aus wie vorher – mit einer Ausnahme: Auf dem Stuhl neben Winkler saß jetzt eine Frau Mitte 20, mit schulterlangem, schimmern-dem Blondhaar, in hellgrauem Rock und weißem Blazer, die Hände im Schoß verschränkt. Ihr Lächeln war dezent, aber offen und freimütig, nicht herausfordernd, sondern freundlich und bejahend. Tatsächlich fühlte sich Krieger, als er ihr so ins Gesicht sah, in allem angenommen, was ihm an Unaussprechlichem in diesem Moment durch den Kopf schoss. Kurzum: Er bekehrte sie auf den ersten Blick.

Sie hieß Ruby, und fortan fieberte Krieger dem wöchentlichen Termin mit Winkler entgegen. Die Beziehungsproblematik war banal: Winkler war eifersüchtig. Er fürchtete, Ruby sei ihm untreu und treibe es mit vielen Männern. Das war absurd, denn sie war ja bloß ein selbst konfiguriertes Softwarekonstrukt. Vermutlich hätte Winkler ein Gespräch mit einem IT-Experten mehr geholfen als die Psychotherapie, doch das sagte Krieger ihm nicht.

Ohne Ruby war Kriegers Leben grau und leer. Er ermunterte Winkler, sich in faden Kindheitserinnerungen zu ergen, weil er hoffte, ihm dabei Rubys Passwort zu entlocken. Beim sechsten Termin war es endlich so weit: Winkler ließ sich eine Stunde lang über das traumatischste Erlebnis seiner Kindheit aus, den Tod seiner geliebten Katze Minni. Als Krieger anschließend den Katzennamen zum Einloggen ausprobierte, stand Ruby lächelnd vor ihm, erwartungsvoll, zu allem bereit.

Dr. Selma Furtwängler war eine zarte, weißhaarige Dame Ende 60 und das, was man früher vergeistigt genannt hätte. Man nahm ihr ab, dass sie die dicken Wälzer in ihrem Bücherregal alle gelesen hatte. Der Therapieraum war mit alten Teppichen ausgelegt, die auch Freud gefallen hätten. Eine Bildwand war das einzige sichtbare Zugeständnis an die Moderne. Im Moment erschien darauf ein blaugraues Meer, das an einen mit runden Steinen übersäten Strand schwappte.

»Nehmen Sie doch Platz, Herr Kollege«, sagte Dr. Furtwängler, eine international anerkannte Koryphäe, und deutete auf einen Stuhl. »Es freut mich, dass Sie gerade mich für die Supervision ausgewählt haben.«

»Und mich ehrt es, dass Sie die Zeit dafür erübrigen.« Krieger blieb stehen, bis Dr. Furtwängler ihn fragend anblickte.

»Wäre es vielleicht möglich, eine weitere Sitzgelegenheit ...? Wir sind nämlich zu zweit.«

Sie hob ein wenig die Brauen, dann holte sie noch einen Stuhl.

»Danke«, sagte er und zog zwei VR-Brillen hervor. Die eine reichte er der Therapeutin. »Wenn Sie die bitte aufsetzen würden ... Ich möchte Ihnen meine Partnerin vorstellen.«

Dr. Furtwängler hatte die Brille kaum auf der Nase, da tauchte auf ihrem bislang unbewegten Gesicht ein warmes Lächeln auf, das immer strahlender wurde.

»Ich denke«, meinte sie mit leicht gurrendem Unterton, »dass wir für Ihren Fall noch mehr Sitzungen benötigen werden.«

DER AUTOR

Norbert Stöbe, Jahrgang 1953, lebt und arbeitet als Übersetzer und Autor in Stolberg. 1982 mutierte er vom Chemiker zum Autor. Neben zahlreichen Storys hat er bislang fünf Romane veröffentlicht, darunter »Der Weg nach unten« und »Morgenröte«. Sein nächster Roman »Kolonie« erscheint Anfang 2017.

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, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke

E-Mail: redaktion@spektrum.de

Ständige Mitarbeiter: Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer, 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

Assistenz des Chefredakteurs: Hanna Hillert

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg

Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741,

E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Claudia Hecker, Dr. Rainer Kayser, Dr. Andreas Nestke, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

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

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

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (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. 37 vom 1. 1. 2016.

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 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:

© 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562,
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchoombe,
Executive Vice President: Michael Florek



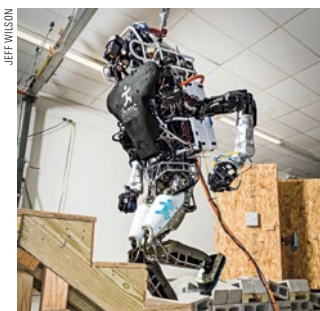
Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



VORSCHAU

LANIAKEA – UNSER KOSMISCHES ZUHAUSE

Die Milchstraße erweist sich als Teil eines gigantischen Galaxiensuperhaufens, der eine der größten Strukturen im bekannten Universum bildet. Mit dieser Entdeckung kann jetzt eine neue Vermessung des Alls beginnen. Ströme von Galaxien, die unter dem Einfluss ihrer gegenseitigen Gravitationsanziehung und der kosmischen Expansion durch den Kosmos fließen, enthüllen die Umriss jener gigantischen Struktur, welche die Astronomen Laniakea taufte – hawaiianisch für »unermesslicher Himmel«.



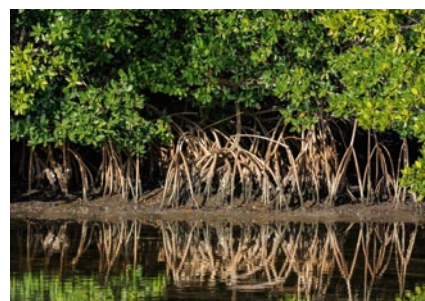
ROBOTER AUF ZWEI BEINEN

Es gibt längst eine Vielzahl rollender, krabbelnder, fliegender Automaten. Doch nach wie vor ist es schwer, Maschinen zu bauen, die gehen können. Für viele Zwecke, etwa beim Einsatz in Katastrophengebieten, würden wir sie benötigen.



EBOLAS ZWEITER ANGRIFF

Ebolaüberlebende in Afrika leiden an Augenproblemen, Muskel- und Gelenkschmerzen sowie neurologischen Symptomen. Zudem müssen sie befürchten, erneut zu erkranken. Denn das Virus kann offenbar im Augapfel und in anderen Organen überdauern.



SALZWASSERTOLERANTE NUTZPFLANZEN

Sowohl mit Gentechnik als auch mit modernster konventioneller Pflanzenzucht gewinnen Forscher Nutzpflanzen, die salziges Wasser aushalten – ein eminent wichtiger Beitrag zu unserer künftigen Ernährung.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren jedes neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

12 x im Jahr Spektrum der Wissenschaft für nur € 89,- (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.



Füllhalter »pur« von Lamy:

Der elegante Füllhalter »pur« aus dem Hause Lamy mit Stahlfeder und Etui ist garantiert auch auf Ihrem Schreibtisch ein Blickfang.

DVD »Die Zelle – Unser geheimes Universum«

Eine fesselnde, erstaunliche und aufwändig inszenierte Reise durch 300 Jahre Forschung rund um die Geheimnisse der Zelle. Spieldauer ca. 150 Minuten



Wählen Sie Ihr Geschenk

Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

www.spektrum.de/abo



Porsche empfiehlt **Mobil 1** und **MICHELIN**

Mehr unter www.porsche.de oder Tel. 0800 3560 - 911, Fax - 912 (gebührenfrei aus dem deutschen Festnetz).

Am Anfang haben auch viele gefragt, wozu man eine Gitarre an Strom anschließen sollte.

Der neue Panamera 4 E-Hybrid.

Tonangebend. Mit einem maximalen Drehmoment von 700 Nm für mehr Beschleunigung. Bei gleichzeitig hoher Effizienz durch ein rennsportlerprobtes Hybridkonzept. Mit aktivem Allradantrieb und Boost-Funktion für noch mehr Adrenalin in Ihrem Alltag. Jetzt starten: www.porsche.de/Panamera



PORSCHE