

Spektrum

der Wissenschaft

Die wahre Ökobilanz der Elektroautos



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

PLAZENTA Verblüffende Einblicke in unser erstes Organ

WOLKEN Wie wirken sie auf den Klimawandel?

EXOPLANETEN Jetzt beginnt die Massenfahndung



Jetzt abonnieren!

**Spektrum
Psychologie** –
Das Magazin für
den modernen,
selbstbestimmten
Menschen...



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

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

Informationen und Bestellmöglichkeit:

www.spektrum.de/aktion/psychologie

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



EDITORIAL ELEKTRISCH, PRAKTISCH, GUT?

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Mein elektrisches Aha-Erlebnis hatte ich im Sommerurlaub 2016. Wir wohnten in einem Hotel in den Schweizer Hochalpen, das einem Stromunternehmen gehört und vermutlich auch aus diesem Grund eine Elektrotankstelle für Gäste zur Verfügung stellt. Mal abgesehen davon, dass ich noch nie so viele Teslas an einem Ort versammelt gesehen habe wie dort – da stand doch tatsächlich obendrein ein elektrisch betriebener VW Golf kostenlos für Testfahrten zur Verfügung! Als eines Tages penetranter Dauerregen jegliche Wanderung verunmöglichte, nahmen wir das Angebot spaßeshalber an, milde neugierig gestimmt, aber ohne besondere Erwartungen. Umso größer mein Erstaunen beim ersten Niederdrücken des Pedals: Eine solche Beschleunigung, ohne jede Verzögerung, und das auch noch praktisch geräuschlos, hatte ich noch nie erlebt. Nach einer zweistündigen Spritztour war für die ganze Familie klar: Unser nächstes Auto wird auf jeden Fall ein Elektro! Kein Lärm, keine Abgase, super Fahrgefühl – was will man mehr? Es ist ja selten genug, dass sich erhöhter Komfort derart gut mit dem ökologischen Gewissen vereinbaren lässt.

Die diversen Skandale der letzten Zeit zum Thema Diesel, Abgas & Co haben nicht nur dieses Gefühl noch verstärkt, sondern auch dem Thema Elektroauto allgemein zu Schlagzeilen und erhöhter Relevanz verholfen. Nur bleibt die Gretchenfrage bestehen – ist solch ein stromgetriebenes Gefährt tatsächlich viel umweltfreundlicher als ein Diesel oder Benziner? Die Sachlage hierzu ist keineswegs eindeutig, sondern auf den ersten Blick eher verwirrend. Grund genug für uns, die aktuellen Studien dazu für unser Titelthema ab S. 12 zu sichten. Denn die Ökobilanz von Elektroautos hängt stark von den konkreten Details ab, zum Beispiel woher der Strom stammt, den man tankt, und wo mit welcher Energie die Batterien produziert wurden.

Überhaupt gelten die Batterien ja als Achillesferse der E-Mobilität. Daher haben wir Dominic Bresser vom Helmholtz-Institut für Elektrochemische Energiespeicherung in Ulm gebeten, den aktuellen Stand der Akkuforschung zusammenzufassen sowie einen Überblick über die verschiedenen derzeit in Entwicklung befindlichen Typen zu geben. Sein Fazit: An einer konsequenten Weiterentwicklung der bewährten Lithiumbatterien führt wohl auf absehbare Zeit kein Weg vorbei. Umso wichtiger ist es daher, deren Herstellung möglichst umweltfreundlich zu gestalten!

Herzliche Grüße
Ihr



NEU AM KIOSK!

Ungewöhnliche Einblicke in den Dreißigjährigen Krieg vermittelt unser Spektrum Spezial Archäologie – Geschichte – Kultur 1.18.

AUTOREN DIESER AUSGABE



ADRIAN ERLEBACHER, SUSAN J. FISHER

Die beiden Mediziner an der University of California in San Francisco haben ein faszinierendes Forschungsobjekt: die Plazenta, das erste Organ des werdenden Menschen (S. 36).



KATE MARVEL

Die Klimaexpertin der New Yorker Columbia University nutzt Satellitendaten und Computermodelle, um zu verstehen, wie der Mensch das System Erde beeinflusst, speziell die Wolkenbildung (S. 50).



JOSHUA WINN

Anfangs hat der US-Astronom vor allem helle Galaxienkerne erforscht. In den letzten zehn Jahren widmete er sich immer intensiver der Frage, wie sich ferne Planeten vor ihrem Stern bemerkbar machen (S. 60).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Ein Polarlicht namens Steve

Die Herkunft der Turmschädel-Frauen

Graphen als Supraleiter

Bier ohne Hopfen

Sonneneruption auf Proxima Centauri

Medikamente verändern Darmflora

Nachwachsendes Rückenmark bei Affen

26 FORSCHUNG AKTUELL

Zwiespältige Stabilität des Neutrons

Zwei Experimente liefern verschiedene Werte.

Tipping Point für die Viskosität von Magma

Die Chemie bestimmt, wie explosiv Vulkane ausbrechen.

Ist Trisomie 21 eine Immunstörung?

Die Chromosomenanomalie scheint die Körperabwehr zu verändern.

34 SPRINGERS EINWÜRFE

Landwirtschaft und Datenhunger

China zeigt, wie umfassende Information die Effizienz auf den Feldern steigert.

59 FREISTETTERS FORMELWELT

Die kleinste Sierpiński-Zahl

Kleine Zahlen haben es manchmal in sich.

68 SCHLICHTING!

Bizarre Unterwasser-schatten

Winzige Dellen mit großer Wirkung.

Serie: Elektromobilität (Teil 1)

12 UMWELT **DIE ÖKOBILANZ DER E-MOBILITÄT**

Industrie und Politik preisen Elektroautos gerne als emissionsfreie Technologie an. In Wahrheit setzt unter anderem deren Herstellung eine ganze Menge Treibhausgase frei.

Von Christopher Schrader

20 BATTERIETECHNIK **ENERGIESPEICHER FÜR EINE ELEKTROMOBILE GESELLSCHAFT**

Forscher tüfteln an vielfältigen Batterietypen, die flexibel Strom liefern.

Von Dominic Bresser

36 SCHWANGERSCHAFT **UNSER ERSTES ORGAN**

Die bislang wenig erforschte Plazenta sorgt für einige Überraschungen.

Von Adrian Erlebacher und Susan J. Fisher

44 ARTENVIELFALT **ZU TODE BEGEHRT**

Der Handel mit exotischen Wildtieren schadet der Biodiversität und bedroht selbst Spezies mit intakten Lebensräumen.

Von Richard Conniff

50 KLIMAFORSCHUNG **DAS WOLKENPARADOX**

Satellitendaten zeigen Verschiebungen in der planetaren Wolkendecke. Wird das den Klimawandel abbremsen oder beschleunigen?

Von Kate Marvel

56 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **GRAPHENPRODUKTION IM HOBBYKELLER**

Graphen hat einzigartige Eigenschaften und gilt als echtes Wundermittel. Die nur atomdicken Kohlenstofffolien sind einfach herzustellen.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

60 ASTRONOMIE **EIN HIMMEL VOLLER EXOPLANETEN**

Planetologen wollen mit spezialisierten Weltraumteleskopen zahllose neue Welten um ferne Sterne entdecken.

Von Joshua N. Winn

70 MATHEMATIK **BRÜCKENBAU FÜR EINZELGÄNGER**

Die Stringtheorie verbindet zwei unterschiedliche mathematische Bereiche.

Von Manon Bischoff

78 DIGITALE GEISTESWISSENSCHAFTEN **AUF ZEITREISE DURCH DAS ALTE VENEDIG**

Tausende von Karten und Manuskripten aus dem goldenen Zeitalter Venedigs werden mit Hilfe künstlicher Intelligenz digitalisiert.

Von Alison Abbott

84 ANTHROPOLOGIE **DIE WIEGE DER GÖTTER**

Entstand die Religion der Maya und Azteken einst im Amazonasbecken?

Von Jörg Denzer

3ALEXD / GETTY IMAGES / iSTOCK. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



12

TITELTHEMA ELEKTROMOBILITÄT

83 ZEITREISE

Vom Maikäferfett zur be-
mannten Mondlandung

88 REZENSIONEN

**Lucy Letherland, Emily
Hawkins:** Der Atlas
der Dinosaurier

Jörg Resag: Feynman
und die Physik

Robert H. Frank:
Ohne Glück kein Erfolg

**Bruno P. Kremer, Fritz
Gosselck:** Die Küste

Laura Spinney: 1918 –
Die Welt im Fieber

94 LESERBRIEFE

95 IMPRESSUM

96 FUTUR III

Überall Parken GmbH
Es muss nicht die Welt
kosten.

98 VORSCHAU

Titelbild: 3alexnd / Getty Images /
iStock; Bearbeitung:
Spektrum der Wissenschaft



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

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

MARKET MOUETTE



36

SCHWANGERSCHAFT UNSER ERSTES ORGAN

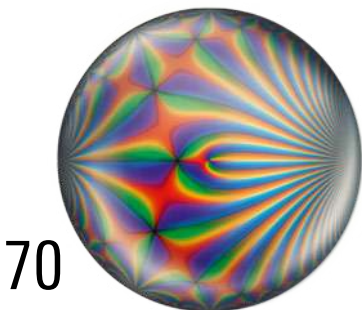
RON MILLER



60

ASTRONOMIE EIN HIMMEL VOLLER EXOPLANETEN

J-FUNKTION: FREDRIK JOHANSSON; GLASSPHÄRE: FOSINZ / GETTY IMAGES / iSTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



70

MATHEMATIK BRÜCKENBAU FÜR EINZELGÄNGER



84

ANTHROPOLOGIE DIE WIEGE DER GÖTTER

JÖRG BENNER

SPEKTROGRAMM





EIN POLARLICHT NAMENS STEVE

► In den Jahren 2015 und 2016 fotografierten Amateurastronomen wiederholt ein seltsames Himmelsphänomen: Ein schmales purpurfarbenes Band, an dessen Rand grüne Streifen flackerten, schob sich von Ost nach West über den Himmel. Das einstündige Spektakel erinnerte an ein Polarlicht, tauchte dafür aber eigentlich zu weit südlich auf, beispielsweise über dem Childs Lake in Südkanada auf gut 51 Grad nördlicher Breite (siehe Bild). Auch andere Details passten nicht: Normalerweise hat *Aurora borealis* die Form von Wolken oder Vorhängen und leuchtet vornehmlich grün, blau oder rot.

Astrophysiker um Elizabeth MacDonald vom NASA Goddard Space Flight Center glauben das Rätsel nun mit Messdaten des Satellitentrios »Swarm« gelöst zu haben. Demnach handelt es sich bei den purpurfarbenen Bögen, denen die Aurora-Jäger den Spitznamen »Steve« gegeben haben, um einen neu entdeckten Typ von Polarlicht, der auf einen westwärts gerichteten Strom extrem schneller Ionen in der oberen Atmosphäre zurückgeht. Solche »subauroral ion drifts« sind zwar seit Jahrzehnten bekannt, bisher war aber nicht klar, dass sie ein ausgeprägtes Farbenspiel hervorrufen.

Science Advances 10.1126/sciadv. aaq0030, 2018



STADT SAMMLUNG FÜR ANTHROPOLOGIE UND PALÄOANATOMIE, MÜNCHEN, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Stark, mittel sowie gar nicht deformierte Schädel (von links nach recht) aus Gräbern in Altenerding und Straubing deuten auf einen seltsamen Brauch hin, der vor gut 1500 Jahren in Osteuropa praktiziert wurde.

ARCHÄOLOGIE HERKUNFT DER TURMSCHÄDEL- FRAUEN

Immer wieder haben Altertumsforscher in 1500 Jahre alten bayrischen Gräbern Frauenskelette mit länglichen Schädeln gefunden. Die ungewöhnliche Form geht vermutlich auf eine Sitte zurück, die in der Gegend der mittleren und unteren Donau seit dem 2. Jahrhundert praktiziert wurde: Man bandagierte Säuglingen den Schädel, um diesem eine länglichere Form zu

geben. Das entsprach offenbar dem damaligen Schönheitsideal oder markierte einen gewissen gesellschaftlichen Status.

Bisher war allerdings umstritten, wie die Praktik nach Bayern gelangte: Adaptierten die Bajuwaren den Brauch aus dem fernen Osteuropa? Oder wanderten Frauen mit verformtem Schädel im Lauf ihres Lebens ins frühmittelalterliche Bayern ein, etwa im Rahmen von Heiratsvereinbarungen zwischen weit entfernten Volksgruppen?

Eine Genanalyse liefert nun starke Argumente für letzteres Szenario. Paläoge-

netiker um Joachim Burger von der Universität Mainz haben das Erbgut von 36 Skeletten sequenziert, die um das Jahr 500 n. Chr. in sechs bajuwarischen Grabfeldern bestattet wurden, darunter auch neun mit länglichem Schädel. Der Studie zufolge unterschied sich das Erbgut dieser Turmschädel-Frauen eindeutig von dem ortsansässiger Bajuwaren und ähnelte eher dem von südosteuropäischen und ostasiatischen Bevölkerungsgruppen.

Die Gene deuten außerdem darauf hin, dass die zugewanderten Frauen

meist braune Augen, braunes Haar und dunklere Haut hatten, wodurch sie sich von ihren vornehmlich blauäugigen und blonden Geschlechtsgenossinnen aus Mitteleuropa abhoben. Dabei kleideten sich die Frauen mit den länglichen Schädeln aber nach bajuwarischer Sitte, wie die Grabbeigaben verraten. Wahrscheinlich lebten sie vor ihrem Tod bereits einige Zeit im heutigen Bayern und waren in ihrer neuen Heimat gut integriert, schreiben die Wissenschaftler.

*PNAS 10.1073/pnas.1719880115
2018*

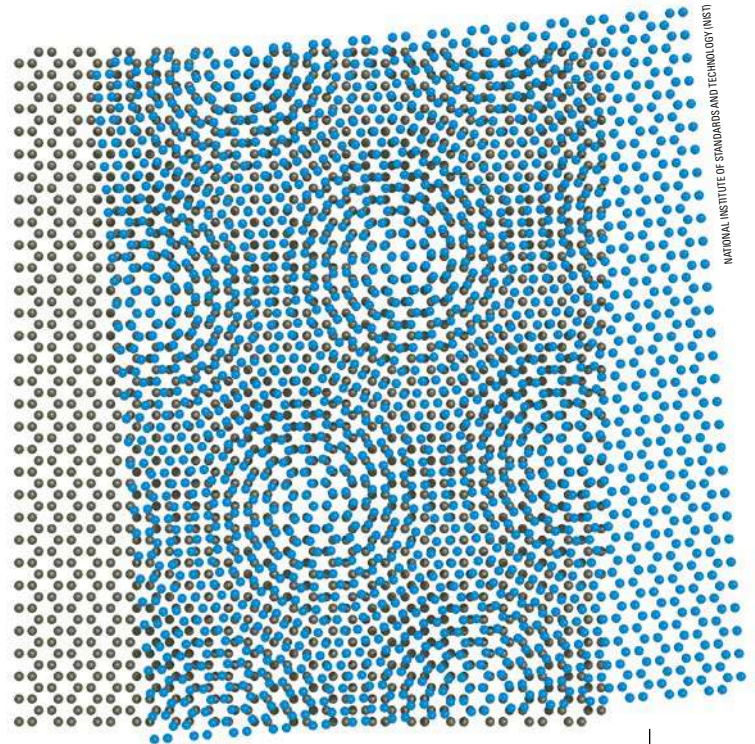
PHYSIK GRAPHEN ALS SUPRALEITER

► Die zweidimensionale Kohlenstoffvariante Graphen, bei der sich Atome in Form von Bienenwaben anordnen, birgt mehr bizarre Eigenschaften, als Wissenschaftler bisher annahmen. Ein Team um Yuan Cao vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston hat zwei Schichten des Stoffs gestapelt und dann um 1,1 Grad gegeneinander verdreht. Das machte das Material supraleitend, ermöglichte also den verlustfreien Transport von Strom.

Die Supraleitung zeigte sich jedoch erst auf den zweiten Blick. Zunächst sammelten sich die für die Leitfähigkeit nötigen Elektronen zwischen direkt übereinanderliegenden Atomen. Dort rückten die Ladungsträger dicht zusammen und stießen sich gleichzeitig ab, wodurch sie sich gewissermaßen gegenseitig gefangen hielten. Aus normalem Graphen, das von Natur aus gut Strom leitet, wurde in der Doppelschicht dadurch ein so genannter Mott-Isolator.

Als die Arbeitsgruppe dann aber noch zusätzliche Elektronen in beide Schichten pumpte, brach die Blockade auf. Die Elektronen erwiesen sich plötzlich als unverhofft beweglich: Bei Temperaturen unter $-271,5$ Grad wurde das Doppelgraphen supraleitend. Allerdings lässt sich der Vorgang nicht mit der Theorie der konventionellen Supraleitung beschreiben. Stattdessen erinnert er die Forscher eher an Hochtemperatur-Supraleiter auf Keramikbasis. Graphen könnte also vielleicht einen Beitrag dazu leisten, dieses exotische Phänomen besser zu verstehen.

Nature 10.1038/nature26160, 2018



NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST)

Legt man zwei Schichten aus hexagonal angeordneten Kohlenstoffatomen übereinander und dreht eine von ihnen leicht gegen den Uhrzeigersinn, entsteht nicht nur ein Moiré-Muster. Aus dem doppellagigen Graphen wird auch – je nach Anzahl der Elektronen zwischen den Atomen – ein Supraleiter oder Nichtleiter.



WIKIMEDIA / GETTY IMAGES / ISTOCK

BIOTECHNOLOGIE BIER OHNE HOPFEN

► Ein Team um Jay D. Keasling von der University of California in Berkeley hat ein hopfenfreies Bier erfunden. Die Forscher modifizierten gängige Bierhefe mit gentechnischen Methoden derart,

Bisher ist Hopfen ein fester Bestandteil von Bier. Gentechnisch veränderte Hefe könnte die Zutat künftig jedoch überflüssig machen.

dass sie zwei Hauptgeschmacksstoffe der Hopfenblüte (die Moleküle Linalool und Geraniol) bereits selbst produziert.

Welche Enzyme im Hopfen die Aromastoffe herstellen, ist bisher unbekannt. Allerdings gibt es andere Pflanzen, die Geraniol und Linalool aus ihrem gemeinsamen Vorläufer Geranylpyrophosphat (GPP) herstellen und bei denen das Gen für das jeweils verantwortliche Enzym bekannt ist. Diese Biokatalysatoren müssen jedoch aktiv genug sein, damit das

Bier am Ende nach ihren Produkten schmeckt. Zum anderen verbraucht Bierhefe ihr GPP extrem effektiv zur Herstellung anderer Moleküle. Daher ersetzen die Forscher zuerst das GPP verwertende Enzym durch ein verwandtes Molekül, das GPP langsamer umsetzt. Außerdem identif-

zierten sie zwei Gene aus Minze und Basilikum, die für die Herstellung von Linalool und Geraniol entscheidend sind, und übertrugen sie in die Hefe. Damit brauten sie dann ein nach Hopfen schmeckendes Bier. Bei einer Blindverkostung bewerteten Tester das mit dieser

Hefe gebraute Getränk sogar als deutlich hopfiger als mit natürlichem Hopfen versetztes Bier.

Die Forscher wollen mit ihrer künstlichen Hefe die Abhängigkeit der Brauereien von der teuren Schlingpflanze verringern. Allerdings sind am authentischen Hopfengeschmack

des Biers weitere Substanzen beteiligt, so dass ein echter Ersatz noch weitere Forschungsarbeit erfordert. Und in Europa müsste solch ein Bier erst aufwändig genehmigt werden, da es gentechnisch verändert ist.

Nature Communications 10.1038/s41467-018-03293-x, 2018

ASTRONOMIE SONNENERUPTION AUF PROXIMA CENTAURI

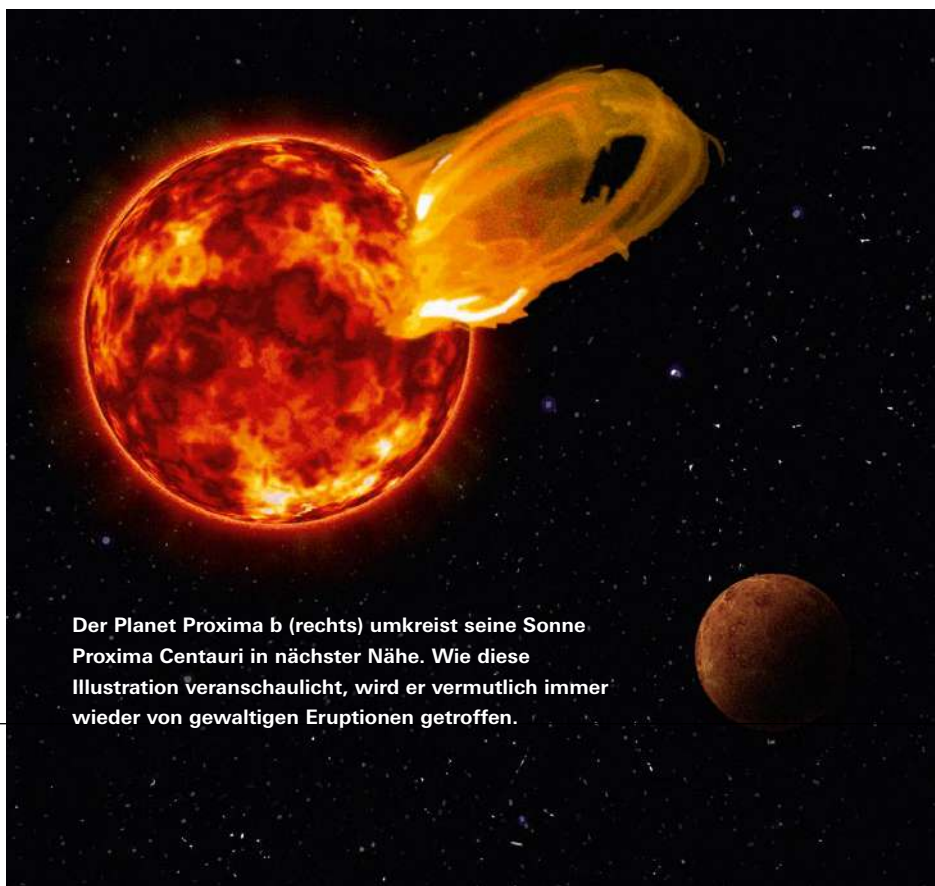
► Der Stern Proxima Centauri ist der nächste Nachbar unserer Sonne und wird von mindestens einem Exoplaneten namens Proxima b umkreist – sogar in der so genannten habitablen Zone, die flüssiges Wasser erlaubt. Es ist jedoch zunehmend fraglich, ob sich in dem Sternsystem, das gut 4,2 Lichtjahre von der Erde entfernt ist, wirklich Leben entwickeln könnte: Der rote Zwergstern feuert immer wieder große Mengen energiereicher Strahlung ins All, die eine etwaige Planetenatmosphäre möglicherweise längst ins All geblasen hat.

Nun berichtet ein Team um Meredith MacGregor von der Harvard University von einem besonders heftigen Ausbruch, der sich am 24. März 2017 ereignete: Innerhalb von zehn Sekunden steigerte sich die Helligkeit von Proxima Centauri um das 1000-Fache, berichten die Astronomen. Dabei setzte der Zwerg zehnmals mehr kurzweilige Mikrowellenstrahlung frei als die Sonne bei ihren stärksten Ausbrüchen – und das, obwohl Proxima Centauri nicht einmal ein Achtel ihrer Masse hat und viel kühler ist.

Für Leben auf Proxima b verheißt solche Ausbrüche nichts Gutes, denn der Planet umrundet seinen Stern in einem 20-fach gerin-

geren Abstand als die Erde unsere Sonne. Auf die gewaltige Eruption waren die Astrophysiker in Aufnahmen des Observatoriums ALMA in Chile gestoßen. Das Ereignis unterscheidet sich dabei deutlich von Ausbrüchen, die Forscher in der Vergangenheit bei Proxima Centauri aufgezeichnet haben. So setzt der Stern alle paar Tage für kurze Zeit zehnmals mehr Röntgenstrahlung frei als gewöhnlich. Hierfür machen die Wissenschaftler Schwankungen in seinem Magnetfeld verantwortlich, wodurch stark ionisiertes Gas nach außen geschleudert wird. Ob der Mechanismus auch den jüngsten Riesenausbruch erklärt, ist den Forschern zufolge noch offen.

ApJL 855, L2, 2018



Der Planet Proxima b (rechts) umkreist seine Sonne Proxima Centauri in nächster Nähe. Wie diese Illustration veranschaulicht, wird er vermutlich immer wieder von gewaltigen Eruptionen getroffen.

ROBERTO MOLAR CANDANOSA / CARNEGIE INSTITUTION FOR SCIENCE, NASA/SO, NASA/JPL

PHARMAZIE MEDIKAMENTE VERÄNDERN DARMFLORA

► Viele Medikamente könnten das Wachstum von Darmbakterien stören. Darauf weisen Versuche mit mehr als 1000 zugelassenen Pharmazeutika hin, die Forscher um Georg Zeller vom European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg durchgeführt haben. Dabei hemmte ein Viertel der untersuchten Stoffe das Wachstum mindestens eines Bakterienstamms,

berichten die Wissenschaftler. Insgesamt hatte das Team für die Reagenzglas-Studie 40 Bakterienarten ausgewählt, die repräsentativ für das menschliche Mikrobiom sein sollen, darunter bekannte Keime wie *Escherichia coli* und die bei Neugeborenen und Säuglingen besonders häufigen Bifidobakterien. Wie sich zeigte, hinderten nicht nur Antibiotika die Mikroben am Wachsen, sondern auch 27 Prozent jener Medikamente, von denen man das nicht erwarten würde, beispielsweise Protonenpumpeninhibitoren oder Antipsychotika.

Möglicherweise ist der Anteil von Arzneimitteln mit negativen Auswirkungen auf Darmbakterien sogar noch größer. Schließlich habe man in der Studie nur einen kleinen Ausschnitt der Mikrobenvielfalt im Darm untersucht, argumentieren die Molekularbiologen.

Die antibakteriellen Effekte könnten erklären, weshalb die Diversität der Mikrobiome von Menschen in Industrieländern abnimmt. Bisher ist aber noch weitgehend unklar, welche Auswirkungen die medikamentös verursachten bakteriellen Veränderungen

im Verdauungstrakt auf unsere Gesundheit haben. Denkbar ist etwa, dass sich dadurch in der Darmflora allgemeine Resistenzmechanismen verbreiten, die zum Beispiel Substanzen mit schädlichen Wirkungen aus den Mikrobenzellen hinausbefördern. Solche Anpassungen würden Bakterien teilweise gegen klassische Antibiotika unempfindlich machen, befürchten Experten. Umgekehrt könnten die antibakteriellen Effekte aber auch dazu dienen, Mechanismen in der Darmflora besser zu verstehen.

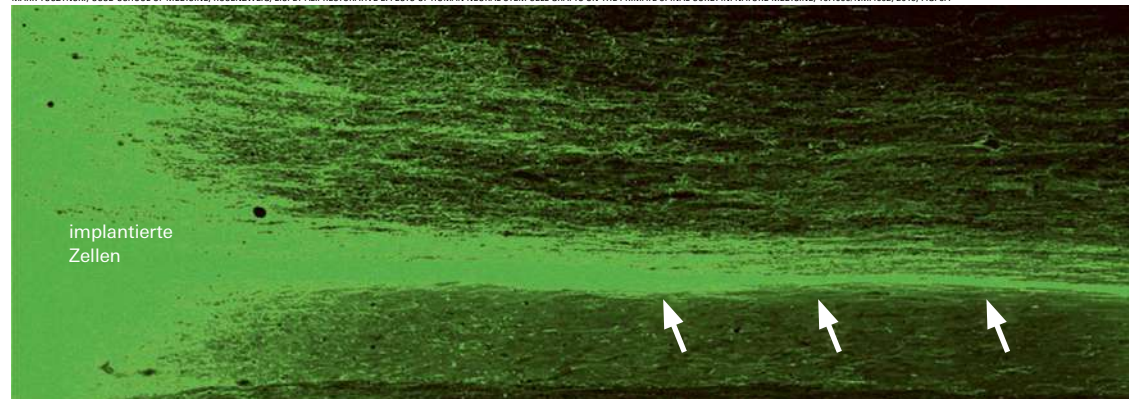
Nature 10.1038/nature25979, 2018

MEDIZIN NACHWACHSENDES RÜCKENMARK BEI RHESUSAFFEN

► Forscher haben neuronale Vorläuferzellen in verletztes Rückenmark von Rhesusaffen implantiert, um so die durchtrennten Nervenbahnen mit neuen Zellen wieder zu verbinden. Bei fünf von neun Tieren mit Erfolg: Sie konnten nach einigen Monaten beispielsweise wieder die Finger um eine Orange legen, berichtet die Gruppe um Mark Tuszynski von der University of California in San Diego. Die Vorläuferzellen stammten dabei aus dem Rückenmark eines acht Wochen alten menschlichen Embryos.

In späteren Untersuchungen zeigte sich, dass ein Teil der Zellen im Rückenmark der Affen zu reifen Nervenzellen ausdifferenzierte. Zudem bildete das Transplantat an die 150 000

MARK TUSZYNSKI, UCSD SCHOOL OF MEDICINE; ROSENZWEIG, E. S. ET AL.: RESTORATIVE EFFECTS OF HUMAN NEURAL STEM CELL GRAFTS ON THE PRIMATE SPINAL CORD. IN: NATURE MEDICINE, 10.1038/NM.4502, 2018, FIG. 3A



Von den implantierten Stammzellen (grün) wachsen neue Nervenfortsätze weit nach rechts. Die Pfeile markieren einen Bereich mit besonders vielen neuen Fasern.

Axone aus – lange Zellausläufer, entlang denen die Zelle elektrische Signale sendet. In den Rhesusaffen erreichten sie eine Länge von bis zu fünf Zentimetern.

Wissenschaftler versuchen seit Jahrzehnten, verletztes Nervengewebe zu heilen. Erfolg hatten sie

bislang aber nur bei Nagetieren. Die Übertragung auf Rhesusaffen gilt daher als wichtiger Fortschritt. Allerdings sind die Mediziner nach wie vor ein gutes Stück von einer klinischen Anwendung bei querschnittsgelähmten Menschen entfernt. So ist beispielsweise nicht gesagt, dass die neu wachsenden Zellfortsätze auch noch weitere Distanzen überwinden, was bei manchen Patienten nötig wäre.

Als größte Hürde erwiesen sich in der Studie die Reaktionen des Körpers auf

die Verletzung: Das geschädigte Gewebe vernarbt dort und wird rasch mit wachstumshemmenden Substanzen durchsetzt. Vor allem aber schwemmt einströmende Zerebrospinalflüssigkeit die implantierten Zellen gleich wieder weg. Der Erfolg trat erst ein, als die Forscher das Immunsystem effektiver unterdrückten und die Affen bei der Transplantation so lagerten, dass die Verletzungsstelle frei von Zerebrospinalflüssigkeit war.

Nature Medicine 10.1038/nm.4502, 2018



UMWELT DIE ÖKOBILANZ DER E-MOBILITÄT

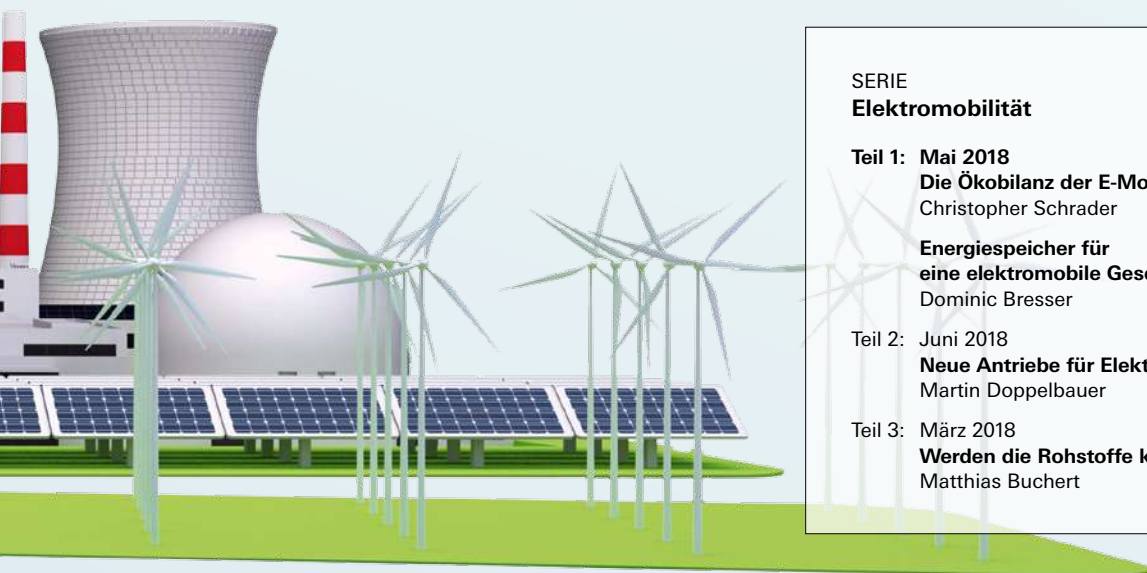
SERIE ELEKTROMOBILITÄT

Sind Elektroautos ein entscheidender Teil der Energiewende, wie Politik und Industrie gerne behaupten? Oder nutzen sie dem Klima weit weniger als erwartet? Eine Spurensuche.

► Wer ein Elektroauto fährt oder auf der Straße vorbeizieht, denkt oft: Geht doch, Autofahren völlig ohne Emissionen. Der Gesetzgeber stuft die Stromer sogar als komplett sauber ein. Laut dem Fahrzeugverzeichnis des Kraftfahrtbundesamts stoßen rein elektrisch angetriebene Autos kein Kohlendioxid aus. Das perfekte Umweltmobil, oder nicht?

Natürlich stimmt das nicht. Auch bei der Elektromobilität entstehen Emissionen. Zwar besitzen Teslas, Elektro-Smarts, e-Golfs und i3-BMWs keinen Auspuff. Dafür haben aber Kohle- und Gaskraftwerke, die in Deutschland 2017 immer noch etwa die Hälfte des Stroms erzeugten, Schornsteine. Die klimatischen Auswirkungen dieser Meiler werden von den Windrädern und Solarparks im Stromnetz nur gemindert, nicht aufgehoben. Und die

Elektroautos tanken Strom – aber längst nicht immer kommt dieser aus erneuerbaren Energiequellen. Nur Anlagen, die extra für die Betankung von E-Autos gebaut wurden, garantieren eine gute CO₂-Bilanz.



SERIE
Elektromobilität

- Teil 1: Mai 2018**
Die Ökobilanz der E-Mobilität
Christopher Schrader
- Energiespeicher für eine elektromobile Gesellschaft**
Dominic Bresser
- Teil 2: Juni 2018**
Neue Antriebe für Elektroautos
Martin Doppelbauer
- Teil 3: März 2018**
Werden die Rohstoffe knapp?
Matthias Buchert



Christopher Schrader ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist in Hamburg. Er recherchiert seit zwei Jahrzehnten regelmäßig zu Themen aus der Mobilitätsbranche und hat für seine Arbeit unter anderem den Journalistenpreis PUNKT der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften erhalten.

» spektrum.de/artikel/1555470

Fabriken, in denen die Autos gebaut werden, verbrauchen Energie. Was sie ausstoßen, muss den Fahrzeugen zugerechnet werden. »Mobilität mit dem Auto gibt es niemals zum ökologischen Nulltarif«, sagt der Umweltchemiker Eckard Helmers von der Hochschule Trier, der sich dort mit der Ökobilanz der E-Mobile beschäftigt. »Wenn Sie ein Gefährt von mindestens 800 Kilogramm Masse im Straßenverkehr bewegen wollen, führt das zu einem relevanten CO₂-Impact.«

Keine seriös aufgestellte Ökobilanz für Batteriemobile stützt daher die Illusion, die Gefährte seien klimaneutral. Im besten Fall sind ihre rechnerischen Emissionen, umgelegt auf den Kilometer Fahrstrecke, geringer als die Treibhausgase, die ein Vergleichsfahrzeug produziert, wenn es Benzin, Diesel oder Erdgas verbrennt. Dafür erfordert jedoch der Bau eines Elektroautos, besonders die Herstellung seiner Batterie, einen Aufwand, der bei keinem konventionellen Wagen anfällt. Ein E-Mobil hat also das Klima schon mehr belastet als ein Auto mit Verbrennungsmotor, wenn beide mit null Kilometern auf dem Tachometer beim Händler stehen. Die eigentlich interessante Frage ist daher, ob Elektroautos über ihren gesamten Lebenszyklus gerechnet einen ökologischen Vorteil gegenüber Dieseln oder Benzinern bieten.

Das ist gar nicht so einfach zu beantworten, weil sehr viele Faktoren eine Rolle spielen: der Stromverbrauch, die Herkunft der Elektrizität, das Klima am Einsatzort, die Herstellung der Batterie und anderer Zusatzkomponenten,

die Lebensdauer und Fahrleistung des Autos, die politischen Rahmenbedingungen. Wie so oft in solchen Fällen entscheiden grundlegende Annahmen über das Ergebnis der Ökobilanz-Studien. So kommt es, dass die Urteile der Fachleute von »der größte ökologische Fortschritt in 100 Jahren Autoentwicklung« (Helmers) bis zu »Elektroautos verschärfen die Klimaprobleme massiv« (Dieter Teufel, Leiter des Umwelt- und Prognose-Instituts in Heidelberg) reichen.

Immer mal wieder spült die Veröffentlichung einer neuen Studie den einen oder anderen Aspekt nach oben, und dann kann das Bild vom Elektroauto in der Öffentlichkeit schnell kippen. So trug im Sommer 2017 das schwedische Umweltforschungsinstitut IVL Daten über die Produktion der Batterien zusammen, und schon schrieb das Nachrichtenmagazin »Der Spiegel« von »Stromillusionen« und »Ökoschwindel«. Wenig später legte das deutsche

AUF EINEN BLICK TREIBHAUSGASEMISSIONEN DER ELEKTROMOBILITÄT

- 1** Bei der Produktion eines Elektroautos gelangen erhebliche Mengen Treibhausgase in die Luft – diese Hypothek muss jedes E-Mobil über Jahre abtragen.
- 2** Der Strom aus der Ladestation ist meist alles andere als CO₂-neutral. Extra dazugebaute Solar- und Windkraftanlagen könnten die Ökobilanz deutlich verbessern.
- 3** Viele seriöse Studien sehen deutsche Elektroautos zurzeit nur auf gleicher Höhe mit sparsamen Verbrennern. Langfristig könnten sie den Straßenverkehr aber deutlich umweltfreundlicher machen.

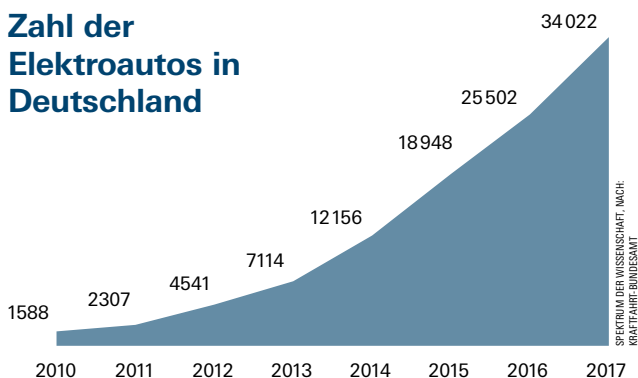
Öko-Institut einen Bericht darüber vor, wie man den Klimavorteil der Elektromobilität sichern könne – dass es an diesem Zweifel geben könnte, haben die Fachleute überhaupt nicht berücksichtigt. Eine Gruppe von 15 emeritierten Mobilitäts- und Infrastrukturprofessoren um Klaus J. Beckmann, bis 2013 Leiter des Deutschen Instituts für Urbanistik in Berlin, versuchte dann im November 2017, die vielen Aspekte in einem offenen Brief zu ordnen – schockiert von dem »Eindruck, dass bei dieser Diskussion die Gesetzmäßigkeiten der Physik außer Acht gelassen werden«.

Keine Frage, die Umweltbilanz von Elektroautos ist komplex. In der folgenden Betrachtung wird daher in erster Linie der Ausstoß von Treibhausgasen im Zentrum stehen – ein Thema, das bereits für sich genommen vielschichtiger ist als weithin angenommen. Andere ökologische Facetten, beispielsweise die Umweltverschmutzung bei Ölförderung oder Akkuentorgung, bleiben dagegen außen vor.

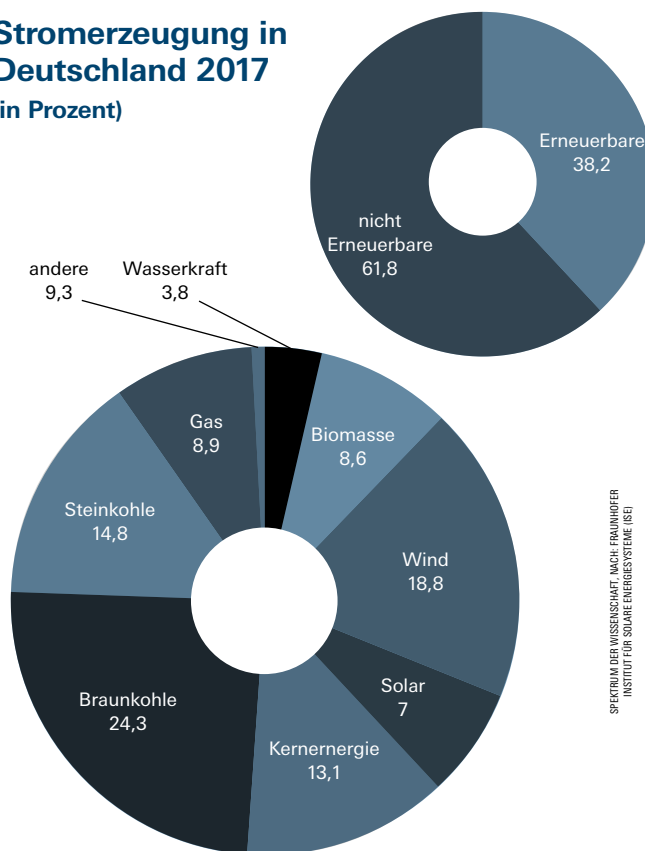
Alle E-Autos starten mit einer CO₂-Hypothek aus der Akkuproduktion in den Straßenverkehr

Am Anfang jeder Ökobilanz steht die Produktion, und Elektromobile sind viel aufwändiger zu konstruieren als herkömmliche Autos. Volkswagen und BMW zeigen das etwas verschämt in den knappen Umwelt-Broschüren ihrer Modelle e-Golf und i3: Bei der Herstellung wird etwa doppelt so viel Kohlendioxid wie bei einem konventionellen Vergleichsprodukt freigesetzt. Beim Wolfsburger Konzern sind es rund neun statt vier Tonnen Kohlendioxid. Dieser Unterschied geht vor allem auf den Bau der Batterien zurück. Die schwedische Übersichtsarbeit des IVL kalkulierte die zusätzliche Emission auf etwa 150 bis 200 Kilogramm CO₂-Äquivalente (bei diesem Maß werden andere, teilweise deutlich potentere Treibhausgase auf die Wirkung von Kohlendioxid umgerechnet) pro Kilowattstunde Speicherkapazität. Andere Forscher kommen auf ähnliche Werte. Ein Team um Jens Peters vom Karlsruher Institut für Technologie taxiert die Emissionen in einer im Januar 2017 erschienenen Studie auf 110 Kilogramm, das Heidelberger ifeu-Institut im Auftrag des Umweltbundesamts auf gut 140 und ein Team um die Industrieökologin Linda Ellingsen von der Norwegian University of Science and Technology auf etwas mehr als 170 Kilogramm CO₂ pro Kilowattstunde Kapazität.

Zahl der Elektroautos in Deutschland



Stromerzeugung in Deutschland 2017 (in Prozent)



Diese Maßzahlen bedeuten für den e-Golf, der zunächst eine Batterie von 24 Kilowattstunden hatte, etwa drei bis fünf Tonnen ausgestoßenes CO₂. Der Wert entspricht ungefähr den Angaben im Umweltprädikat, mit dem Volkswagen 2014 sein Auto bewarb. Inzwischen hat der Energiespeicher des Modells jedoch 36 Kilowattstunden Kapazität – damit dürfte auch die Menge der bei der Herstellung freigesetzten Treibhausgase um die Hälfte angewachsen sein.

Eine eher kleine Rolle beim Effekt für das Klima spielt dabei die genaue chemische Zusammensetzung der Batterie (siehe dazu auch den Artikel ab S. 20), eine deutlich größere die geografische Herkunft, weil die Fabriken bei der Aufbereitung der Rohstoffe und der Herstellung der Speicherzellen eine Menge Strom verbrauchen. Dass zurzeit viele Batterien aus China kommen, wo viel Elektrizität von ineffizienten Kohlekraftwerken stammt, belastet daher die Bilanz der Autos. »Es hängt allerdings auch in China vom genauen Standort der Fabrik ab«, sagt der Ingenieur Peter Kasten, der an der Berliner Zweigstelle des Öko-Instituts zu nachhaltiger Mobilität forscht. »Im Südosten stammt etwa ein Drittel des Stroms aus erneuerbaren Energien, im Norden vor allem aus Kohlekraftwerken.«

Die Batteriemobile starten also mit einem schweren ökologischen Rucksack. Nehmen wir als Durchschnittswert einen zusätzlichen Ausstoß von fünf Tonnen CO₂ an, vor allem für die Produktion des Stromspeichers, dann entspricht das der Verbrennung von 1900 Litern Benzin oder 1670 Litern Diesel. Damit kommen die sparsamsten Verbrenner ungefähr 40 000 Kilometer weit, bevor das

Elektroauto überhaupt vom Hof rollt. Dabei ist übrigens schon berücksichtigt, dass die beiden Kraftstoffe nicht auf Bäumen wachsen: Bis sie an der Tankstelle aus der Zapfsäule fließen, sind durch die Förderung und die Aufbereitung von Rohöl und den Transport bereits Treibhausgase freigesetzt worden – man spricht von der so genannten Vorkette. Unter anderem die Forschungsstelle für Energiewirtschaft in München hat hierzu genaue Zahlen veröffentlicht: Demnach bringt eine Kilowattstunde Energie aus Dieselverbrennung 299 Gramm CO₂ mit sich, wovon 33 Gramm auf die Vorkette entfallen. Bei Benzin lauten die entsprechenden Zahlen 295 und 61 Gramm. Bei der Verbrennung eines Liters Benzin werden dann knapp neun Kilowattstunden Energie frei, bei Diesel sind es fast zehn.

Auch der getankte Strom ist fast immer mit Emissionen behaftet

Wer annimmt, dass Elektroautos keine Emissionen produzieren, macht fast immer den gleichen Denkfehler: Er nimmt an, die Gefährte würden exklusiv mit Strom aus erneuerbaren Quellen betankt. Elektrizität im Netz lässt sich allerdings nicht nach Farben in grünen Ökostrom und braunen Kohlestrom sortieren; durch die Leitungen fließt immer eine Mischung. Im Mittel sind laut Umweltbundesamt 2016 für jede Kilowattstunde Strom 527 Gramm CO₂ ausgestoßen worden. Das Elektroauto Ioniq von Hyundai hat damit nach offiziellen Angaben eigentlich eine rechnerische Emission von 60 Gramm, ein Opel Ampera-e 76 Gramm, ein Citroën Berlingo zum Aufladen 93, ein Ford Focus Electric 81, und ein Model S von Tesla kommt auf bis zu 125 Gramm CO₂ pro Kilometer.

Mangels guter Daten zum Strombedarf im realen Verkehr muss diese Rechnung zunächst auf den offiziellen Verbrauchswerten beruhen. Es ist anzunehmen, dass die Hersteller die Werte ähnlich schönen wie bei Verbrennern – dort liegt der Verbrauch bisweilen um ein Drittel höher. Mit großer Vorsicht sollte man auch die Angaben zu Hybrid-Fahrzeugen betrachten. Hier steckt hinter der Herstellerangabe mitunter eine nie überprüfte Vermutung, wie häufig der Käufer tatsächlich auflädt.

Generell lässt sich aber wohl festhalten: Was die Stromer im Fahrbetrieb dem Klima zumuten, ist weniger, als vergleichbare herkömmliche Autos ausstoßen. Mit einem Verbrennungsmotor kommen die sparsamsten kleinen Fahrzeuge auf knapp unter 100 Gramm CO₂ pro Kilometer, alle anderen bewegen sich im deutlich dreistelligen Bereich, teilweise sogar im oberen. Die Batterie-mobilen ersparen der Umwelt allerdings nicht diese

ganze Menge, sondern es sind nur 20 oder 30, maximal 40 Gramm Differenz gegenüber Sparmodellen mit Verbrennungsmotoren. Dreistellige Gramm-Einsparungen gibt es höchstens in der Luxusklasse, wo das Auto von Tesla fährt. Dieses hat zwar mit die schlechteste CO₂-Bilanz unter den E-Mobilen, aber es tritt gegen die besonders klimafeindlichen SUVs und Sportwagen unter den Verbrennern an. Womöglich kommen in Zukunft noch mehr solche elektrischen Großmobile auf den Markt. Das ist in Sachen Ökobilanz vermutlich keine gute Nachricht – die emeritierten Professoren erheben darum in ihrem Manifest bereits folgende Forderung: »Auch ohne die Elektrifizierung von Kfz, aber spätestens damit besteht ein dringender Anlass, Größe und Gewicht von Personalfahrzeugen zu begrenzen oder wenigstens zu besteuern.«

Die Zahlen zu den Emissionen pro Kilometer mit dem heutigen Strommix zeigen jedenfalls: Um mit den gängigen zweistelligen Differenzwerten von Gramm Kohlendioxid pro Kilometer zusätzliche fünf Tonnen Kohlendioxid aus der Batterieproduktion auszugleichen, müssten Elektroautos normaler Dimensionen schon in die Größenordnung von 150 000 Kilometern an Fahrleistung kommen. Ein durchschnittlicher deutscher Pkw-Nutzer hat diese Strecke erst nach zehn bis zwölf Jahren zusammen.

Anders sieht es aus, wenn man mit echtem Ökostrom rechnet. Dazu genügt es jedoch nicht, einen entsprechenden Tarif für den Privathaushalt zu bestellen und das Elektroauto in der eigenen Garage aufzuladen. Diese Elektrizität stammt oft aus konventionellen Kraftwerken und wird mit Zertifikaten etwa aus Norwegen umdeklariert. Damit trägt sie so oder so bereits zum Strommix bei: Würde man die klimaschonende Eigenschaft der Elektrizität exklusiv dem Auto zurechnen, verschlechterte sich die Bilanz für andere Anwendungen entsprechend – ein Nullsummenspiel.

Stattdessen müsste die nötige Strommenge von einem eigens für diesen Zweck neu errichteten Windrad oder Solarpark stammen, fordert die Nationale Plattform Elektromobilität, ein Beratungsgremium der Bundesregierung zur Elektromobilität. Eine strenge Bedingung: Die Anlage darf eigentlich nur dem elektrischen Verkehr dienen und keine öffentlichen Zuschüsse oder Einspeisevergütungen in Anspruch nehmen. Das schließt auch so manche Photovoltaikanlage auf dem

Wenn es nur wenige Ladestellen gibt, brauchen E-Autos große Akkus. Die sind allerdings schlecht für das Klima.



eigenen Dach aus, die schon vor dem Kauf des Elektroautos existierte.

Einige Autofirmen haben dies inzwischen verstanden und speisen für ihre Batteriemobile den Strom aus neuen Anlagen ins Netz. Daimler zum Beispiel, lobte das Öko-Institut in einem Bericht aus dem Mai 2017, habe ein Windrad finanziert und »ordnet die grüne Eigenschaft des Stroms kommunikativ dem Fahrstromverbrauch der Elektrofahrzeuge aller Kunden zu«. Damit stellte das Institut den Fahrern der ersten Generation von Elektro-Smarts eine Art entsprechendes Zertifikat aus. »Leider führt Daimler das wahrscheinlich nicht fort«, bedauert Öko-Institut-Ingenieur Peter Kasten heute. Erst wenn nämlich der Fahrstrom aus solchen Anlagen kommt, kann der Emissionsfaktor der regenerativ erzeugten Elektrizität in die Ökobilanz des Autos einfließen. Dann wird nicht mehr die so genannte CO₂-Intensität des Strommixes aus der Steckdose von 527 Gramm pro Kilowattstunde berechnet, sondern der Wert für die tatsächliche Quelle der Elektrizität.

Die Produktion von Solarzellen und Windrädern setzt Treibhausgase frei

Auf null fällt der Ausstoß trotzdem nicht ganz: Auch bei der Erzeugung von Windstrom an Land werden laut Umweltbundesamt elf Gramm CO₂ pro Kilowattstunde frei, bei Fotovoltaikanlagen sind es 68 Gramm. Das sind wiederum rechnerische Emissionen – auch die Solarzellen und ihre Ständer, die Flügel, Masten und Getriebe der Windräder müssen schließlich hergestellt, transportiert, aufgestellt, angeschlossen und gewartet werden. Der Aufwand dafür wird später auf die erzeugte Energiemenge umgelegt. Würde ein Tesla Model S tatsächlich exklusiv mit dem Strom aus einem eigens gebauten Windrad geladen, ergäbe sich ein Ausstoß von 3 statt 125 Gramm Kohlendioxid pro Kilometer auf der Straße. Und wer sich zum Opel Ampera-e noch Solarzellen auf dem Dach kauft, die die ganze Energie für das Auto liefern, ist später für Emissionen von 10 statt 76 Gramm pro Kilometer Fahrstrecke

verantwortlich – jeweils im Vergleich zum Aufladen mit dem deutschen Strom des Jahres 2016.

Viele seriöse Ökobilanzen sehen Elektroautos, die normalen deutschen Strom tanken, zurzeit ungefähr auf gleicher Höhe mit sparsamen Verbrennern. Die Nationale Plattform Elektromobilität und das Umweltministerium bescheinigen dem Akkuantrieb einen 12- bis 16-prozentigen Vorteil, und auch der Trierer Umweltchemiker Eckard Helmers sieht die Stromer in einer aktuellen Studie vorne. Das gilt Helmers' Berechnungen zufolge bereits dann, wenn man mit dem deutschen Strommix von 2013 rechnet; seither ist die Emission pro Kilowattstunde noch um zirka zehn Prozent gesunken.

Das Team um Dieter Teufel vom Umwelt- und Prognose-Institut (UPI) in Heidelberg sieht in einem 2017 veröffentlichten Bericht ebenfalls einen leichten Vorteil für Batteriemobile, wenn man sie isoliert – also nur nach den bisher genannten Kriterien – betrachtet. Zuletzt sprachen lediglich die Heidelberger Kollegen vom ifeu-Institut dem sparsamen Diesel einen leichten Vorteil zu. Ihre Studie hatte das Umweltbundesamt erst 2016 veröffentlicht. Doch auch diese Forscher zeigen mit Ende August 2017 aktualisierten Zahlen in einem Onlinerechner, dass das Batteriemobil die Nase vorn haben kann, wenn man annimmt, dass die Energiewende weitergeht. Es kann allerdings bis zum neunten Fahrzeugjahr dauern, bis sich der Vorteil der Elektromobilität zeigt. Diese Studien berücksichtigen übrigens alle die genannte Vorkette, auch bei der Herstellung von konventionellen Kraftstoffen.

Der Unterschied zwischen vielen Untersuchungen steckt letztlich in Details: Werden Fahrzeuge ähnlicher Größe verglichen, kommt der Diesel, der mehr Feinstaub und Stickoxide, aber weniger CO₂ freisetzt als Benziner, dem Elektroauto nahe, insbesondere wenn dessen Batterie etwas üppiger bemessen ist. Geht es hingegen um den Durchschnitt der zugelassenen Autos, in den gerade bei den Selbstzündern viele deutlich übermotorisierte, schwere Wagen einfließen, haben die im Mittel kleineren Elektro-

Teslas Gigafactory soll den Preis für Batterien deutlich senken. Die Abbildung zeigt ein Computermodell – bisher sind nur Teile der Anlage im US-Bundesstaat Nevada fertig.





DPA / IMAGINECHINA / YI WANG SH

Zahlreiche Akkus werden in China hergestellt, wo – je nach Region – viel Strom aus Kohlekraftwerken kommt. Das verschlechtert die Ökobilanz der E-Mobile.

autos einen eingebauten Vorteil, zumindest bisher. Außerdem kommt es stark auf die Voraussetzungen und Bezugsjahre an. »Wenn eine Studie erscheint, sind die darin formulierten Annahmen wegen der Dynamik des Marktes oft schon wieder veraltet«, seufzt Peter Kasten vom Öko-Institut.

Die Rechnung sieht wie gesagt deutlich anders aus, wenn tatsächlich echter Ökostrom aus zusätzlich errichteten Anlagen in den Tank fließt. Dann sind die Elektroautos in allen Bilanzrechnungen unreichbar sauber. Laut der Heidelberger ifeu-Studie fallen für den Diesel über den ganzen Lebenszyklus gerechnet ungefähr 190 Gramm CO₂ pro Fahrkilometer an, wenn man alle Faktoren zusammenrechnet. Beim Elektromobil mit Windstrom sind es nur 60 Gramm.

In diesen Zahlen liegt übrigens eine nationale Versuchung. Deutschland könnte mit den deutlichen Ersparnissen in der Nutzungsphase seine eigene Emissionsbilanz polieren und dabei galant übersehen, dass die großen Emissionen während der Batterieproduktion in asiatischen Ländern, vor allem in China zu Buche schlagen. Die Treibhausgase allerdings verändern das Klima völlig unabhängig davon, auf welcher Seite von irdischen Grenzen sie in die Atmosphäre gestiegen sind. Eine solche Betrachtungsweise wäre daher unseriös.

Unsere Zwischenbilanz lässt sich von etlichen Faktoren in beide Richtungen verschieben. Nachteile entstehen beispielsweise, wenn ein Elektroauto unbedingt eine Reichweite von 400 statt von 150 bis 200 Kilometern haben soll. Dann braucht es eine doppelt so große Batterie, und man müsste unrealistische 300 000 Kilometer fahren, um seinen ökologischen Rucksack abzutragen. Außerdem muss das E-Mobil seinen doppelt so schweren Stromspeicher auch noch herumschleppen und verbraucht darum mehr Energie als eigentlich nötig. Einen Einfluss hat zudem, dass es in Deutschland im Winterhalbjahr kalt und neblig ist. Heizung und Gebläse eines Elektromobils gehen zu Lasten der Batterie, während die nötige Wärme

beim herkömmlichen Auto ein Abfallprodukt ist. Das kann den Verbrauch eines Fahrzeugs mit Akkuantrieb im Extremfall um die Hälfte steigern. Entwickler an der Technischen Universität München haben darum beim Entwurf ihres Modells Visio.M ernsthaft überlegt, ein Heizsystem einzubauen, das Bioalkohol zur Wärmeproduktion verbrennt.

Weitere Nachteile entstehen, wenn Elektroautos zum falschen Zeitpunkt geladen werden, sobald es Millionen solcher Fahrzeuge gibt. Eine erhöhte Energienachfrage zu einem Zeitpunkt, an dem gerade wenig erneuerbarer Strom zur Verfügung steht, kann den Strommix negativ beeinflussen. Die Autos sollten somit eine intelligente Ladesteuerung haben, die mit dem Netz zusammen bestimmen kann, wann es günstig ist, Energie zu tanken.

Die Ökobilanz der Gefährte profitiert hingegen davon, wenn sie in Dänemark, Österreich, der Schweiz oder einem anderen Land gefahren und betankt werden, das einen sehr hohen Anteil erneuerbarer Energie im Strommix hat. In Österreich werden zum Beispiel um die 150 Gramm CO₂ pro Kilowattstunde freigesetzt, gerade mal 28 Prozent des deutschen Werts aus dem Jahr 2016. Dadurch sinken die rechnerischen Emissionen eines BMW i3 von 66 auf 19 Gramm pro Kilometer Fahrstrecke.

Wichtig ist darüber hinaus der Blick auf die Handhabung der Batterien: Wenn sie nicht leer gefahren oder voll aufgeladen werden, verlängert das ihre Lebensdauer, da der Einsatz an den Kapazitätsgrenzen die Materialien belastet. Zudem erwärmt sich der Energiespeicher übermäßig, wenn er jenseits von 85 Prozent seiner Ladekapazität weiter Strom aufnehmen soll. Erste Erfahrungen bei Tesla-Modellen zeigen immerhin, dass die Akkus eher länger halten als anfangs befürchtet.

Sofern die Energiewende weitergeht, werden Elektroautos im Lauf der Zeit immer sauberer

Den Elektroautos kommt es ebenfalls zugute, wenn sie vor allem in der Stadt fahren. Beim häufigen Anfahren und Bremsen gewinnen sie viel Bewegungsenergie wieder zurück, während Verbrennungsmotoren hier besonders ineffizient arbeiten. Die Kehrseite ist, dass stromgetriebene Gefährte bei Überlandfahrten ihr höheres Gewicht mitschleppen müssen.

Elektroautos werden ohne eigenes Zutun mit der Zeit immer sauberer. Damit ist nicht nur gemeint, dass mit jedem Modellwechsel Effizienzgewinne zu erwarten sind, bessere Batterien, leistungsfähigere Elektronik, mehr Leichtbauteile. Auch ein 2017 angeschafftes Batteriemobil ist 2025 vermutlich für weniger rechnerische Emissionen verantwortlich, weil der Strommix in Deutschland kontinuierlich »grüner« wird. Das Bundesumweltministerium gibt an, dass sich die auf den Kilometer bezogene Umweltbilanz eines Elektroautos innerhalb einer zwölfjährigen Lebensdauer um etwa ein Drittel verbessern könnte. Dazu müsste der Emissionsfaktor der Elektrizität im Jahr 2029 auf rund 350 Gramm CO₂-Ausstoß pro Kilowattstunde fallen. Das ist nach verschiedenen Szenarien für die künftige Entwicklung immerhin denkbar. Eine Studie vom Öko-Institut und dem Fraunhofer Institut für System- und

Innovationsforschung (ISI) hat acht solche Ausblicke zusammengetragen, die Emissionsfaktoren liegen dabei zwischen 233 und 376 Gramm Kohlendioxid pro Kilowattstunde erzeugter Elektrizität.

Auch bei der Batterieproduktion sollte sich in den kommenden Jahren einiges tun. Sobald der Tesla-Gründer Elon Musk in Nevada seine Gigafactory für Batterien fertig stellt (siehe Bild S. 16), die Solarstrom vom eigenen Dach verbrauchen soll, dürften sich die Mengen der ausgestoßenen Treibhausgase für die Energiespeicher halbieren, erwarten Fachleute. Noch besser wäre eine Produktion in einem Land wie Norwegen oder Island, die sehr sauberen Strom aus Wasserkraft und Geothermie nutzen. Fabriken in Deutschland brächten hingegen nur einen geringen Vorteil gegenüber China.

Streng genommen spielt das bei der Bilanzrechnung für ein heute als Neuwagen zugelassenes Elektroauto allerdings keine Rolle mehr, denn seine Batterie ist ja schon hergestellt. Doch viele Hersteller verkaufen ihren Kunden die Energiespeicher gar nicht, sondern vermieten sie an sie, auch um die Sorgen der Autokäufer wegen der neuen Technologie zu dämpfen. Sollte die Komponente daher ausgetauscht werden müssen, würde der Ökobilanz zwar ein weiterer ökologischer Rucksack hinzugefügt, aber vermutlich auf Basis der dann aktuellen, verbesserten Produktionsbedingungen.

Damit wäre der alte, ausgetauschte Akku nicht unbedingt bloß ein ökologischer Klotz am Bein. Viele Fachleute denken schon darüber nach, den Autobatterien ein zweites Leben zu ermöglichen. Wenn die Energiespeicher deutlich gealtert wirken, liegt es vielleicht nur an einigen Dutzend der Tausenden von Einzelzellen. Tüftler könnten sie austauschen, um den Akku danach als »generalüberholt« zu vermarkten. Oder das Aggregat wird noch einige Jahre lang in irgendeinem Keller installiert, um tagsüber den Solarstrom vom Dach aufzunehmen und abends wieder abzugeben. Das ist eine einfachere Aufgabe, als an jeder Ampel die Energie fürs beherzte Anfahren bereitzustellen und wenig später beim scharfen Bremsen wieder Strom einzuspeichern.

Die Käufer von E-Autos nutzen ihr Gefährt besonders eifrig – ein Beispiel für den Rebound-Effekt

Ähnliche Projekte hat Daimler mit gebrauchten Smart-Batterien in Lünen bei Dortmund sowie mit einem Ersatzteillager für die Energiespeicher in Herrenhaus bei Hannover begonnen. Außerdem gibt es viele Ideen dazu, die Batterien von Elektroautos, die tagsüber zum Beispiel auf dem Firmenparkplatz stehen oder sich nachts in der heimischen Garage aufladen, als Puffer für Netzschwankungen zu verwenden. In Kopenhagen wird das Verfahren bereits erprobt. In jedem dieser Fälle müsste man den ökologischen Rucksack der Batterieproduktion auf das Auto und die Mit- oder Nachnutzer verteilen. Wie genau man das berechnen soll und ob das alles überhaupt wirtschaftlich funktioniert, ist indes noch offen.

Die Käufer von Batteriemobilen ändern anscheinend ihre Verkehrsgewohnheiten und sind viel mit ihren Gefährten unterwegs, das ermittelte 2013 eine Studie des ISI im



Daimler AG

In einem Pilotprojekt im westfälischen Lünen hat Daimler Batteriesysteme aus Elektrosmarts zu einem 13-Megawattstunden-Energiespeicher für das Stromnetz zusammengeschaltet.

Auftrag der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften. Vielleicht leitet sie dabei die Überzeugung, damit der Umwelt etwas Gutes zu tun, vielleicht wollen sie auch den hohen Anschaffungspreis möglichst schnell durch die geringeren laufenden Kosten ausgleichen. Zudem – das zeigt zumindest eine Studie der norwegischen Ökonomen Bjart Holtmark und Anders Skonhoft – fahren etwa 85 Prozent von ihnen mit dem Auto zur Arbeit, während das weniger als die Hälfte der Besitzer normaler Wagen tun. Entsprechend verschmähen die Elektromobil-Nutzer weitgehend Fahrräder und den öffentlichen Nahverkehr.

In der Umweltforschung nennt man das Rebound-Effekt: Wer ein umweltfreundliches Produkt kauft, neigt oft dazu, es häufiger zu benutzen als ein reguläres, ob nun LED-Lampe oder Elektroauto. Das frisst einen Teil der möglichen Einsparungen gleich wieder auf oder verkehrt die Wirkung sogar ins Gegenteil. Zudem werden die heutigen Elektroautos oft stillschweigend als Zweitwagen vermarktet und genutzt, fand 2017 ein Team um Dieter Teufel, den Leiter des UPI, heraus. Nur eine Minderheit der Käufer ersetzt ihr bisheriges Auto mit einem Batteriemobil. Die elektrisch betriebenen Fahrzeuge könnten also den Verkehr sogar noch steigern, fassen die Heidelberger Experten die Situation in ihrer detaillierten Studie zusammen. Die Untersuchung gehe über die Ökobilanz hinaus in Richtung Technologiefolgenabschätzung, so Institutsleiter Teufel.

Und nicht nur das geänderte Verhalten ihrer Besitzer spielt eine Rolle, sondern auch die Entscheidungen anderer Käufer. Dazu trägt die Fiktion bei, Elektroautos erzeugen keine Emissionen. Wenn das Auto mit einem Ausstoß von null in der Verkaufstatistik seines Herstellers steht, kann dieser beruhigt ebenfalls ein konventionelles Fahrzeug anbieten, dessen Verbrauch den so genannten Flottengrenzwert seiner Produkte weit überschreitet – im Mittel passt's dann wieder. Diese Verrechnung beruht auf

einem Beschluss der Europäischen Union. Die CO₂-freie Einstufung der Elektromobile sollte Autokonzerne dazu anregen, den elektrischen Antrieb zu entwickeln, was etliche Experten als Anreiz vergleichbar zu den Subventionen für Windräder begrüßen oder zumindest akzeptieren. »Diese Regelung hat aber kein Auslaufdatum«, beschwert sich Dieter Teufel. Sie erlaube es den Herstellern, praktisch unbegrenzt weiterhin große, Sprit fressende Geländewagen zu verkaufen. »Deren übermäßiger Ausstoß von CO₂ wird dann durch die Fiktion vom Nullemissions-elektromobil ausgeglichen, ohne dass die Konzerne Strafen zahlen müssten, weil der Flottenverbrauch zu hoch ist.« So könnten die Hersteller für jedes Elektromobil fünf SUVs verkaufen und dabei 10000 Euro an Geldbußen einsparen, spitzt Teufels Team den Vorwurf zu.

Bisher ist es nur um den Ausstoß von Treibhausgasen gegangen. Eine Rechnung für andere Schadstoffe oder Umwelteffekte wie Feinstaub oder Flächenverbrauch sähe ganz anders aus. Nur ein Aspekt: Weil Elektroautos aus dem Stand mit vollem Drehmoment beschleunigen können, belasten sie ihre Reifen womöglich stärker als herkömmliche Fahrzeuge. Der Abrieb der Pneu ist jedoch eine erhebliche Komponente beim Feinstaub, der an vielen stark befahrenen Kreuzungen zum Problem wird. Die 15 Verkehrsprofessoren um Klaus Beckmann regen in ihrem Manifest darum eine Abregelung des Motors an, um die Beschleunigung zu begrenzen.

Außerdem sind batterieelektrische Fahrzeuge nicht die einzigen mit einer Antriebstechnik, die auf Strom basiert. Autos mit einer Brennstoffzelle tanken Wasserstoff, der in Zukunft durch Elektrolyse aus überschüssigem Windstrom hergestellt werden könnte – im Augenblick entsteht er freilich vor allem aus Erdgas. Im Fahrzeug macht die Brennstoffzelle daraus Strom und treibt so einen Elektromotor an. Der Vorteil ist, dass sich ein solches Fahrzeug sehr schnell betanken ließe. Aber man bräuchte dafür erhebliche Investitionen in eine flächendeckende Tankinfrastruktur.

Eine andere Möglichkeit ist, den Wasserstoff nach der Elektrolyse mit CO₂ zu Methan zu veredeln, das im norma-

Die Deutsche Post entwickelte einen eigenen Elektrolaster, weil es auf dem Markt noch kein geeignetes Modell gab.



KARL-FRIEDRICH HOHL / GETTY IMAGES / ISTOCK

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ISTOCK / BJDZK

len Erdgasnetz gespeichert wird. Erdgasautos können es tanken und fahren damit trotz Verbrennungsmotor gewissermaßen mit Strom; einen solchen Versuch gibt es von Audi. Ähnliche Ansätze probieren, unter Stromeinsatz flüssige, künstliche Kraftstoffe herzustellen. Als im November 2017 CDU/CSU, FDP und Grüne über eine Jamaika-Koalition berieten, verwies der Präsident des Club of Rome, Ernst Ulrich von Weizsäcker, auf diese beiden Möglichkeiten und warnte davor, sich voreilig auf einen Antrieb mit Batterie und Elektromotor festzulegen.

Kommen wir zum Fazit: Elektroautos sind nicht automatisch der Klimaretter, als der sie seitens der Politik und Industrie gerne verkauft werden. Aber sie könnten künftig einen erheblichen Beitrag dazu leisten, den Straßenverkehr umweltfreundlicher zu gestalten – manche glauben, es sei die einzige realistische Strategie. Dazu müssen allerdings heute die Weichen richtig gestellt werden: Herstellung und Gebrauch der Batteriemobile müssen effizienter werden, der Strom zum Fahren sollte aus zusätzlich errichteten regenerativen Energiequellen stammen, und Luxuswagen mit besonders großen Motoren und Stromspeichern sollten durch ordnungspolitische Eingriffe begrenzt werden. Auf die Dauer muss sich ebenfalls die Einstellung der Kunden ändern, mit dem Auto jederzeit komfortabel überall hinfahren zu wollen, also sowohl täglich zur Arbeit als auch mit Kindern, Hund und Gepäck in den Camping-Urlaub. Vor allem sollte die Zahl der gefahrenen Kilometer nicht steigen. Wer auf all das achtet, kann mit einem Elektroauto schon heute die Umwelt schonen. ◀

QUELLEN

Helmers, E., Weiss, M.: Advances and Critical Aspects in the Life-Cycle Assessment of Battery Electric Cars. In: Energy and Emission Control Technologies 5, S. 1–18, 2017

Helms, H. et al.: Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Umweltbundesamt, Texte 27/2016

Peters, J.F. et al.: The Environmental Impact of Li-Ion Batteries and the Role of Key Parameters – A Review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, S. 491–506, 2017

Teufel, D. et al.: Ökologische Folgen von Elektroautos. Ist die staatliche Förderung von Elektro- und Hybridautos sinnvoll? Umwelt- und Prognose-Institut Heidelberg, UPI-Bericht Nr. 79, 2. Auflage 2017

Timpe, C. et al.: Handlungsbedarf und -optionen zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität. Endbericht zum »Wissenschaftlichen Analyse- und Dialogvorhaben zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität« (Vergabenummer 16EM2111) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Ökoinstitut, Freiburg 2017

BATTERIETECHNIK ENERGIESPEICHER FÜR EINE ELEKTROMOBILE GESELLSCHAFT





SERIE ELEKTROMOBILITÄT Um fossile Energieträger und Verbrennungsmotoren abzulösen, bedarf es vor allem haltbarer Speichersysteme, die flexibel Strom liefern. Forscher tüfteln an vielfältigen Batterietypen, die das leisten sollen.



Dominic Bresser leitet eine Nachwuchsgruppe am Helmholtz-Institut für Elektrochemische Energiespeicherung in Ulm, die neue Elektrodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien erforscht.

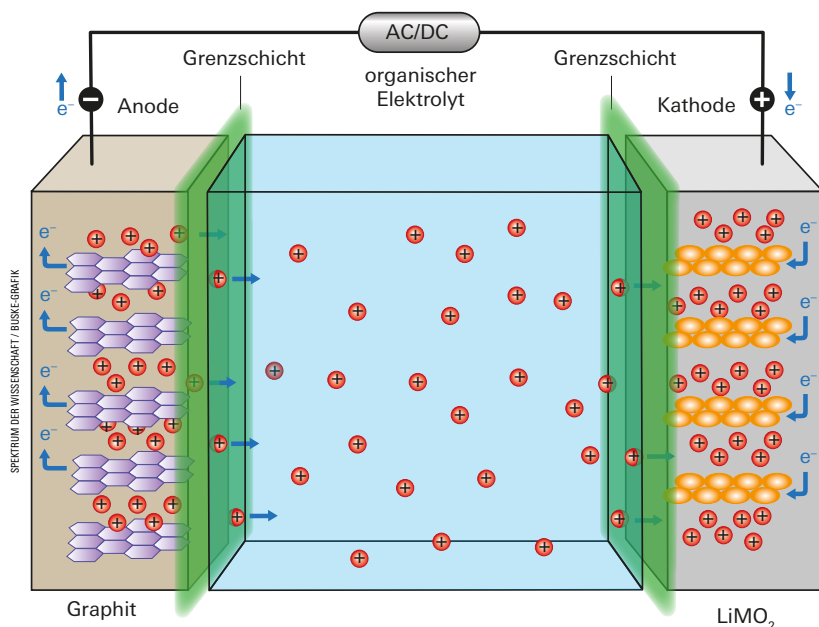
» spektrum.de/artikel/1555472

Der Umstieg auf erneuerbare Energieträger stellt vermutlich eine der größten Herausforderungen unserer Zeit dar. Nicht nur, dass Kohle, Erdöl und Erdgas über kurz oder lang zur Neige gehen werden, auch der Klimawandel zwingt uns, den Verbrauch fossiler Brennstoffe deutlich zu reduzieren. In den vergangenen Jahren haben regenerative Quellen wie Biomasse, Sonnenenergie und Windkraft entsprechend stark an Bedeutung gewonnen.

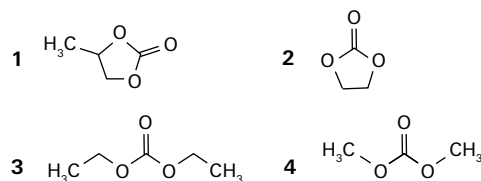
Sie bringen jedoch eine neue Herausforderung mit sich: effiziente Speicherung. Damit Strom fließt, wenn er tatsächlich benötigt wird, und nicht nur, wenn gerade die Sonne scheint oder Wind weht. Darüber hinaus erfordert unsere wachsende Mobilität portable und zugleich langlebige Energiespeicher, etwa für Smartphones, Laptops oder elektrisch betriebene Fahrzeuge. Letztere sind außerdem auf eine Infrastruktur angewiesen, die Strom oder andere Energieträger entlang von Verkehrswegen flächendeckend zur Verfügung stellt.

Grundsätzlich gibt es zwei Optionen, den Energiebedarf einer mobilen Gesellschaft zu decken: Zum einen können wir flüssige oder gasförmige Kraftstoffe aus regenerativen Quellen herstellen, beispielsweise Bioethanol aus Zuckerrohr oder Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser. Diese lassen sich gut handhaben, sind transportabel und weisen relativ hohe Energiedichten auf. Der Anbau von Energiepflanzen beansprucht jedoch große Ackerflächen, für die oft Wälder gerodet werden, und konkurriert zudem mit der Nahrungsmittelproduktion. Beim Wasserstoff wiederum beträgt der Wirkungsgrad nur etwa 40 Prozent, und das Gas ist aufwändiger zu speichern.

Das Auto der Zukunft: Leistungsfähige Batterien erlauben bereits heute Fahrten über mehrere hundert Kilometer – ohne einen einzigen Tropfen Öl zu verbrennen. In den kommenden Jahren wollen Forscher noch deutlich höhere Energiedichten erreichen und so den Umstieg vom Verbrenner auf das E-Auto vorantreiben.



Eine Lithium-Ionen-Batterie nutzt positive Lithiumteilchen (rot) als Ladungsträger. Beim Entladen wandern sie aus der Graphitanode in die Kathode, die aus einem Lithiummetalloxid (LiMO_2) besteht. Als Lösungsmittel für den Elektrolyten verwendet man ringförmiges Propylenkarbonat (1) oder Ethylenkarbonat (2). Letzteres bildet an den Elektroden eine Grenzschicht, die Ionen passieren lässt und verhindert, dass sich das organische Lösungsmittel zersetzt. Kettenförmige Moleküle wie Diethylkarbonat (3) oder Dimethylkarbonat (4) verbessern die Leitfähigkeit des Elektrolyten.



Eine andere und kommerziell sehr erfolgreiche Möglichkeit der Energiespeicherung bieten Batterien. Die funktionieren nach einem anderen Prinzip: Anstatt dass man chemische Verbindungen durch Verbrennen in nutzbare Energie umwandelt, steckt diese bei Batterien in reversibel (umkehrbar) ablaufenden elektrochemischen Prozessen. Die Menge an Strom, die Batterien speichern, bekommt man so relativ verlustfrei wieder heraus, manche erreichen einen Wirkungsgrad von über 90 Prozent.

Einer der verbreitetsten Typen ist die Blei-Säure-Batterie, die bereits Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelt wurde. Sie ist zuverlässig und günstig und findet vor allem als Starterbatterie in Autos Verwendung. Gleichzeitig ist sie jedoch recht groß und schwer. Zudem enthält sie giftiges Schwermetall. Nachdem in der EU bereits umweltschädliche Nickel-Kadmium-Batterien verboten sind, gibt es Bestrebungen, bleihaltige Autobatterien ebenfalls durch eine umweltfreundlichere Technologie zu ersetzen: Lithium-Ionen-Batterien.

Seit der Markteinführung durch die japanische Firma Sony im Jahr 1991 haben Batterien, die auf dem Leichtmetall Lithium basieren, wesentlich zur massenhaften Verbreitung mobiler Endgeräte beigetragen: Sie versorgen Smartphones, Laptops und Digitalkameras zuverlässig mit Strom und werden immer leistungsfähiger, ohne dabei an Größe oder Gewicht zuzulegen. Auf Grund der hohen Leistungs- und Energiedichte gewinnt die Lithium-Ionen-Technologie in vielen Bereichen zunehmend an Bedeutung, etwa als Antrieb von Zweirädern, Autos, Bussen oder gar Schiffen sowie als stationärer Energiespeicher.

Entscheidend für die Leistungsfähigkeit sowie für die Lebensdauer und Kosten von Lithium-Ionen-Batterien ist ihre Zellchemie, sprich die chemischen Komponenten und Prozesse beim Laden und Entladen. Das Element Lithium (Li) gehört zur ersten Hauptgruppe des Periodensystems – den Alkalimetallen – und bildet einfach positive Kationen

(Li^+), die elektrische Ladung zwischen der negativen und der positiven Elektrode transportieren. Die Anode (Minuspole beim Entladen) einer Lithium-Ionen-Batterie besteht typischerweise aus Graphit. Diese Form des Kohlenstoffs weist eine Schichtstruktur auf und ermöglicht eine relativ hohe Energiedichte. Als Kathode (Pluspol beim Entladen) dient Lithiumkobaltdioxid (LiCoO_2) oder eine ähnliche Verbindung, in der andere Metalle wie Nickel oder Mangan das Kobalt teilweise ersetzen.

Batteriehersteller behandeln die Rezepte für organische Elektrolyte wie Staatsgeheimnisse

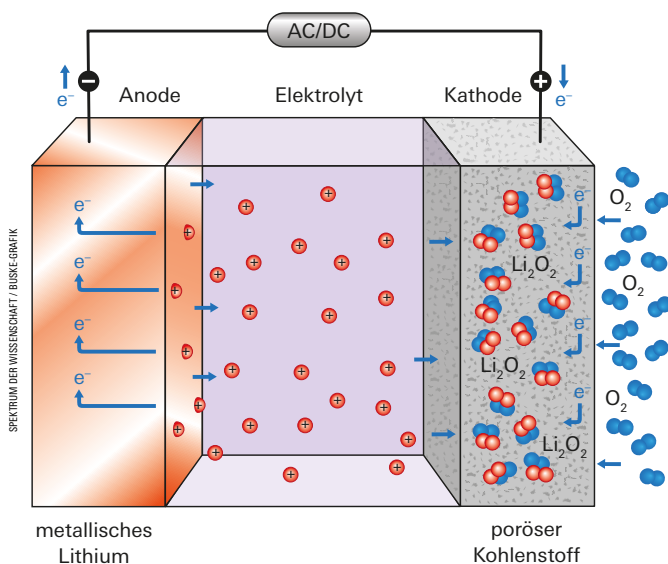
Neben geeigneten Elektrodenmaterialien, die eine dichte Einlagerung der Ladungsträger erlauben, benötigt man eine Elektrolytlösung, die eine Zellspannung von zirka vier Volt verträgt. Wässrige Elektrolyte bilden bei einer derart hohen Spannung reaktive Gase: Darum verwenden die Hersteller Leitsalze wie Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6) in einem organischen Lösungsmittel. Während dieses in den ersten Lithium-Ionen-Batterien noch Propylenkarbonat war, setzt man heute auf Ethylenkarbonat. Letzteres bildet beim ersten Aufladen der Batterie eine stabile Schicht an der Graphitanode. Diese so genannte »solid electrolyte interphase« (SEI) ist elektrisch isolierend, lässt aber ausreichend Ionen passieren und verhindert, dass sich das organische Lösungsmittel bei weiteren Ladezyklen allmählich an der Anode zersetzt. Auf Grund der hohen Viskosität von Ethylenkarbonat werden diesem andere lineare (kettenförmige) organische Verbindungen beigemischt, zum Beispiel Diethyl- oder Dimethylkarbonat, welche die Fließfähigkeit und somit die Leitfähigkeit des Elektrolyten verbessern. Darüber hinaus gibt es weitere organische Zusätze, die helfen, die anodische Grenzschicht zu stabilisieren und die Sicherheit des Elektrolyten zu verbessern, indem sie etwa die Entflammbarkeit herabsetzen. Die genauen Zusammensetzungen der verwendeten Elektro-

lyte gehören jedoch zu den am besten gehüteten Geheimnissen der Batteriehersteller.

Bei den Kathoden herrscht inzwischen eine große Vielfalt verwendeter Materialien. Ein Typ etwa sind die so genannten Schichtoxide. Sie weisen eine schichtartige Mikrostruktur auf und bestehen aus Lithium sowie einem Übergangsmetall und Sauerstoff. Anfänglich nutzte man vor allem LiCoO_2 . Davon ausgehend kann man das Kobalt (Co) jedoch auch sukzessive ersetzen, durch andere Übergangsmetalle wie Nickel (Ni) und Mangan (Mn) oder Metalle wie Aluminium und Magnesium. Das stabilisiert die Struktur der Kathode und erhöht die Energiedichte. Lange Zeit setzten die Hersteller im Bereich der Elektromobilität Kathoden mit einem Ni:Mn:Co-Verhältnis von 1:1:1 ein und erreichten damit eine spezifische Kapazität (die Ladungsmenge pro Gewichtseinheit) von zirka 155 Milliamperestunden pro Gramm. Bei neueren Batterien liegt dieses Verhältnis gewöhnlich bei 5:3:2 beziehungsweise 6:2:2, was die spezifische Kapazität auf 165 bis 180 Milliamperestunden pro Gramm steigert. Mit einer weiteren Erhöhung des Nickelanteils (Ni:Mn:Co = 8:1:1) wollen Forscher in den nächsten Jahren eine Steigerung auf über 185 Milliamperestunden pro Gramm erzielen. Dafür müssen sie allerdings die Zyklenfestigkeit, also die Lebensdauer des Materialmix verbessern: Im Lauf mehrerer hundert Lade- und Entladezyklen verändert sich die Struktur der Kathode, so dass die Entladungstiefe der Batterie abnimmt und sie nicht mehr ihre ursprüngliche Kapazität erreicht.

Eine alternative, langzeitstabile Kristallstruktur bieten Kathoden aus Lithiummetallphosphaten. Meist verwendet man bei diesem Typ Lithiumeisenphosphat (LiFePO_4), kurz

Lithium-Sauerstoff- oder Lithium-Luft-Batterien enthalten eine Anode aus metallischem Lithium. Beim Entladen gibt diese Elektronen ab, während Lithiumionen (rot) in einer Kathode aus porösem Kohlenstoff mit Luftsauerstoff (blau) zu Lithiumperoxid (Li_2O_2) reagieren.



AUF EINEN BLICK BATTERIEN FÜR ELEKTRISCHE MOBILITÄT

- 1 Nachhaltige Verkehrskonzepte, die auf regenerative Energieträger statt auf fossile Brennstoffe setzen, erfordern leistungsfähige, langlebige Stromspeichersysteme.
- 2 Für Elektroautos eignen sich auf Grund der hohen Energiedichte vor allem Lithium-Ionen-Batterien. Forscher arbeiten an neuen Elektrodenmaterialien und Elektrolyten, die größere Reichweiten erlauben.
- 3 Alternative Technologien wie Lithium-Sauerstoff- oder Redox-Flow-Batterien könnten ebenfalls eine Rolle bei der Mobilitätswende spielen: etwa als stationäre Energiespeicher.

LFP. Das Elektrodenpotenzial von LFP ist mit zirka 3,5 Volt jedoch vergleichsweise niedrig, so dass es trotz einer hohen spezifischen Kapazität (170 Milliamperestunden pro Gramm) eine geringere Energiedichte besitzt als Schichtoxide. Allerdings hat LFP den Vorteil, dass es kürzere Ladezeiten ermöglicht. Zudem erlaubt es auf das giftige und verglichen mit Eisen weitaus seltenere Kobalt zu verzichten. Und auch dieses Kathodenmaterial lässt sich optimieren: Indem Forscher Eisen teilweise durch Mangan ersetzen, können sie das Elektrodenpotenzial und damit die Energiedichte von LFP-Batterien merklich steigern.

Ähnliche Ansätze verfolgen Materialwissenschaftler bei einer dritten Kathoden-Familie, den Lithiummanganoxiden (LiMn_2O_4). Hier tauscht man Manganatome gegen Nickelatome. Zum einen erhöht dies das Elektrodenpotenzial von 4,0 bis 4,1 Volt auf etwa 4,7 bis 4,8 Volt und folglich die Energiedichte. Zum anderen verhindert die Substitution von Mangan durch Nickel, dass sich Mn^{2+} -Ionen aus dem Kathodenmaterial lösen. Diese entstehen, wenn aus eher instabilen Mn^{3+} -Ionen durch so genannte Disproportionierung stabilere Mn^{2+} - und Mn^{4+} -Ionen entstehen. Lithiummanganoxide bieten ebenfalls den Vorteil einer kurzen Ladezeit und eines Verzichts auf das Element Kobalt. Entsprechend intensiv sind sowohl die universitäre als auch die industrielle Forschung in diesem Bereich.

Auf der Anodenseite ließe sich die Energiedichte erhöhen, indem man etwa dem Graphit Silizium beziehungsweise Siliziumoxid beimischt. Silizium hat, zumindest theoretisch, eine Kapazität von 3580 Milliamperestunden pro Gramm – das Zehnfache von Graphit. Darüber hinaus ist es in großen Mengen verfügbar, sein Massenanteil an der Erdkruste beträgt zirka 25 Prozent. Problematisch ist bei siliziumhaltigen Lithiumbatterien jedoch das Verhalten der Ladungsträger an der Anode: Anders als beim Graphit lagern sich die Lithiumionen nicht einfach in eine Schichtstruktur ein (Chemiker sprechen von Interkalation), sondern bilden mit dem Silizium eine Legierung. Bei dieser

Reaktion verändert sich dessen Kristallstruktur, und das Anodenmaterial dehnt sich stark aus, was die Zyklenfestigkeit erheblich vermindert.

Daher suchen Forscher nach weiteren Möglichkeiten, die Kapazität von Batterien zu erhöhen. Viel versprechend ist metallisches Lithium an Stelle von Graphit als Anode. Graphit kann lediglich ein Lithiumion pro sechs Kohlenstoffatome interkalieren. Das begrenzt die Energiedichte und sorgt für einen relativ großen Materialbedarf – und so für ein hohes Gewicht. An einer Lithiumanode hingegen können sich die Ionen direkt anlagern. Ein Problem ist gegenwärtig allerdings noch das ungleichmäßige Abscheiden von Lithium an solchen Anoden. Dabei wachsen oft so genannte Dendriten, verzweigte Strukturen, die den elektrisch isolierenden Separator durchstoßen und damit die Zelle kurzschließen können. Das ist gefährlich: Ein Kurzschluss setzt Wärmeenergie frei, wodurch die verschiedenen Komponenten der Zelle schrittweise zersetzt werden. Im schlimmsten Fall kann dies dazu führen, dass eine Batterie Feuer fängt – begünstigt durch die leicht brennbaren und flüchtigen Elektrolyt-Lösungsmittel – oder infolge von Gasentwicklung gar explodiert. Chemiker arbeiten fieberhaft daran, diese Gefahr zu beseitigen. Eine Anreicherung des Elektrolyten mit Zäsiumionen etwa kann verhindern, dass sich Dendriten bilden und Lithiumzellen überhitzen.



ISTOCK / ALENGO

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

www.spektrum.de/t/batterien-und-akkus

Wenn sich metallisches Lithium als Anodenmaterial sicher verwenden ließe, könnte man in Kombination mit alternativen Kathodenmaterialien, die ohne Übergangsmetall auskommen, die Energiedichte von Batterien möglicherweise bedeutend erhöhen. Zwei billige Materialien eignen sich dafür: Schwefel und Sauerstoff (O_2). Schwefel fällt in großen Mengen als Abfallprodukt bei der Raffination von Erdöl an, und der Sauerstoff, der sich an der Kathode mit den Lithiumionen zu Lithiumperoxid (Li_2O_2) verbindet, ist in der Umgebungsluft reichlich vorhanden. Tatsächlich hat die Entwicklung von Lithium-Schwefel-Batterien in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht. So konnten Wissenschaftler etwa die schwache elektrische Leitfähigkeit von Schwefelkathoden deutlich erhöhen, indem sie Schwefel-Nanopartikel in einem hochporösen Trägermaterial aus Kohlenstoff einbetteten. In den kommenden Jahren könnte diese Batterietechnologie den Sprung von der Forschung in die kommerzielle Anwendung schaffen.

Hoffnungen setzen Entwickler auch in Lithium-Sauerstoff- oder Lithium-Luft-Batterien, die theoretisch die 10-

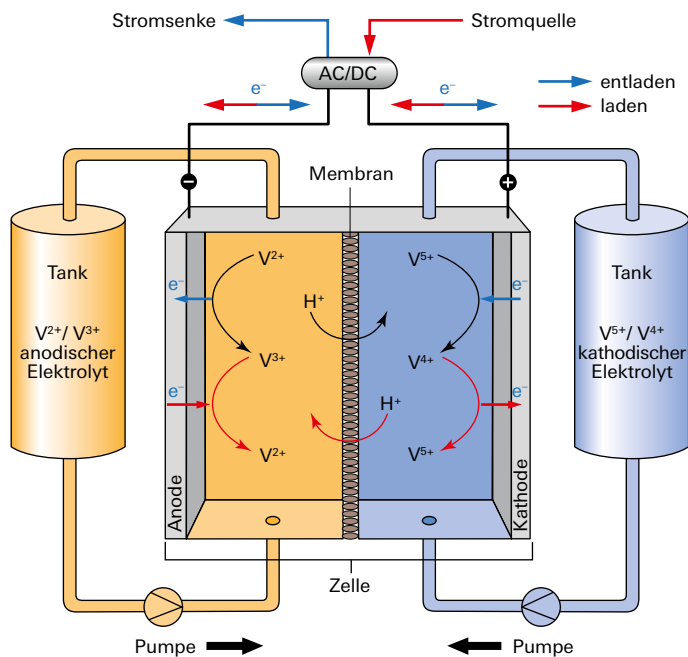
bis 20-fache Kapazität herkömmlicher Lithium-Ionen-Zellen erreichen können und durch die Verwendung von Luftsauerstoff als aktivem Kathodenmaterial besonders leicht sind. Dass Batterien dieses Typs tatsächlich irgendwann auf den Markt kommen, ist auf Grund ungelöster technischer Schwierigkeiten aber unklar. Zum einen benötigt man hochselektive Membranen, die ausschließlich Sauerstoff durchlassen und die Luftbestandteile Stickstoff, CO_2 sowie Wasserdampf zurückhalten, da sie die Leistungsfähigkeit herabsetzen. Zum anderen verläuft die Reaktion von Lithium mit Sauerstoff an der Kathode meist nicht vollständig reversibel, so dass Lithium-Luft-Zellen schnell altern. Auch reaktive Sauerstoffradikale, die als Zwischenprodukt beim Laden und Entladen entstehen, verkürzen die Lebensdauer. Sie führen zur Korrosion der Kathode. Somit ist die kommerzielle Anwendung von Lithium-Sauerstoff-Batterien derzeit nicht absehbar. Wegen der potenziell sehr hohen Energiedichte und der möglichen Gewichteinsparung dürfte die Forschung in dieser Richtung jedoch weitergehen.

Nicht nur Lithium eignet sich als Ladungsträger

Neben der Erforschung neuer Anoden- und Kathodenmaterialien, die Batterien mit höherer Energie- und Leistungsdichte erlauben, suchen Wissenschaftler auch nach alternativen Elektrolyten. Diese sollen Lithium-Ionen-Batterien in erster Linie sicherer machen. Insbesondere feste Elektrolyte aus Keramik oder leitfähigen Polymeren eignen sich dafür. Ferner kommen flüssige Elektrolyte auf Phosphorbasis, die schwer bis nicht entzündlich sind, in Frage, ebenso wie organische Salze, die bei Raumtemperatur flüssig sind – so genannte ionische Flüssigkeiten. Keramische und polymere Festelektrolyte haben den positiven Nebeneffekt, dass sie prinzipiell eine homogenere Abscheidung von Lithiumionen an Lithiumanoden und mitunter eine beständigere Grenzfläche zwischen Elektrolyt und Elektrode ermöglichen. In Frankreich setzt man Batterien mit polymeren Festelektrolyten im Bereich der Elektromobilität bereits erfolgreich ein.

Zwar konzentrieren sich die weltweiten Forschungsaktivitäten vor allem auf Lithium-Ionen-Batterien. Da die Lithiumreserven der Erde jedoch begrenzt sind, erproben Wissenschaftler zunehmend andere Elemente als Ladungsträger. Eine Alternative ist Natrium, das wie Lithium ein Alkalimetall ist und sich sowohl physikalisch als auch chemisch sehr ähnlich verhält. Viele Erkenntnisse aus der Lithium-Ionen-Forschung sind daher übertragbar. Zwar reichen Natrium-Ionen-Zellen nicht an die Ladungsdichte von lithiumbasierten heran und sind wesentlich schwerer. Dennoch könnten sie in vielen Bereichen als Ersatz dienen, etwa als stationäre Speicher für regenerative Energien. Denn sie wären vermutlich günstiger: Die Natriumvorkommen der Erde sind nahezu unerschöpflich – was den Preis drückt.

Bereits kommerziell verfügbar sind so genannte Hochtemperatur-Batterien auf Natrium-Schwefel-Basis, die bei rund 300 Grad Celsius laufen. Bei diesem Typ trennt ein fester Keramikelektrolyt mit mobilen Natriumionen eine flüssige Natriumanode von einer ebenfalls flüssigen



Redox-Flow-Batterien basieren auf reversiblen chemischen Reaktionen, die in zwei getrennten Elektrolytkreisläufen ablaufen. Lediglich Protonen (H⁺-Ionen) können zum Ladungsausgleich über eine Membran in den jeweils anderen gelangen. Als Reaktionspartner eignen sich Vanadiumionen (Vⁿ⁺).

Schwefelkathode. Die hohe Betriebstemperatur sorgt für eine ionische Leitfähigkeit vergleichbar mit der von wässrigen Elektrolyten. Des Weiteren erlauben die Flüssigelektroden einen relativ widerstandsfreien Ionentransport. Natrium-Schwefel-Batterien erreichen eine Lebensdauer von etwa 4000 bis 5000 Lade- und Entladezyklen und weisen eine geringe Selbstentladung sowie eine hohe Energieeffizienz (zirka 75 Prozent) auf. Eine große Herausforderung ist jedoch die Herstellung qualitativ hochwertiger Keramikelektrolyte. Zudem sind die flüssigen Elektrodmaterialien überaus korrosiv.

Eine weitere Hochtemperatur-Batterie, die eine Anode aus flüssigem Natrium und einen keramischen Elektrolyten verwendet, ist die ZEBRA-Batterie (Zero Emission Battery Research Activities). Im Unterschied zur Natrium-Schwefel-Batterie kommt hier eine Kathode aus Nickelchlorid (NiCl₂) zum Einsatz. Das erhöht die Zellspannung und erlaubt eine geringere Betriebstemperatur (zirka 270 Grad). Allerdings ist die Energiedichte von ZEBRA-Batterien geringer, so dass sie weniger weit verbreitet sind.

Nach einem völlig anderen Prinzip funktionieren Redox-Flow-Batterien – auch bekannt als Flüssigbatterien –, die mittels Reduktions-Oxidations-Reaktionen chemische Energie in elektrische umwandeln. Die Prozesse laufen dabei in zwei separaten Elektrolytkreisläufen ab, die eine ionenselektive Membran trennt. Diese Batterietechnologie bietet den großen Vorteil, Energiedichte und Leistung zu entkoppeln, da die Lösungen mit den elektrochemisch aktiven Reaktionspartnern in externen Tanks lagern. Wie

viel Strom die Zelle liefert, entscheidet letztlich nur die Größe des Elektrolytreservoirs.

Der bekannteste Vertreter dieses Batterietyps ist die Vanadium-Redox-Flow-Batterie. Sie enthält einen Schwefelsäureelektrolyten, in dem Salze des Elements Vanadium (V) gelöst sind. Das recht häufige Übergangsmetall kann unterschiedliche Oxidationsstufen annehmen, so dass es sich gut als elektrochemisch aktive Spezies für Redox-Flow-Zellen eignet. Entlädt sich diese, oxidieren V²⁺-Ionen an der Anode zu V³⁺-Ionen. Dabei werden Elektronen frei, so dass V⁵⁺ an der Kathode zu V⁴⁺ reduziert. Zum Ladungsausgleich können Protonen (H⁺-Ionen) aus dem anodischen Elektrolytkreislauf über eine ionenselektive Membran in den kathodischen gelangen. Beim Aufladen der Zelle laufen die Prozesse in umgekehrter Richtung ab.

Für Redox-Flow-Batterien sprechen vor allem die hohe Energieeffizienz von etwa 80 Prozent und ihre Langlebigkeit, die mehr als 10 000 Lade- und Entladezyklen betragen kann. Nachteilig hingegen sind die Toxizität des Vanadiums und die eher geringe Energiedichte beziehungsweise der große Platzbedarf ausreichend leistungsfähiger Redox-Flow-Batterien. Sie bieten sich daher vornehmlich als stationäre Energiespeicher an, bei denen Größe und Gewicht sekundär sind – in Deutschland zum Beispiel laufen erste Tests mit Windkraftanlagen. Ob sich die Technologie jedoch im Bereich der Elektromobilität durchsetzen kann, ist unklar.

Der E-Mobilitäts-Markt der Zukunft bietet Platz für verschiedene Arten von Batterien

Je nach zu Grunde liegender Chemie bieten die vorgestellten Zelltypen unterschiedliche Vorteile hinsichtlich Lebensdauer, Energiedichte und Leistung sowie Kosten und Nachhaltigkeit. Aktuell treiben sowohl universitäre als auch industrielle Forschung vor allem die Entwicklung von Batterien auf Lithiumbasis voran, da sie am ehesten geeignet scheinen, den Übergang vom Verbrennungs- zum Elektromotor zu beschleunigen: Sie sind vergleichsweise klein, leicht und ermöglichen praxistaugliche Reichweiten. Doch auch Umweltverträglichkeit und die Möglichkeit, teure Batteriekomponenten zu recyceln, spielen eine immer wichtigere Rolle bei der Bewertung der verschiedenen Batterietypen. Man darf daher annehmen, dass sich solche, die auf alternative Ladungsträger oder räumlich getrennte Reaktionszellen setzen und auf kritische Materialien verzichten, langfristig ebenfalls am Markt etablieren werden. Sie könnten vor allem die stationäre Versorgung einer zukünftig elektromobilen Gesellschaft mit Strom aus regenerativen Quellen gewährleisten. ◀

QUELLEN

Bresser, D., Passerini, S.: Electrical and Electrochemical Energy Storage Applications. In: Badescu, V. et al.: Advanced Power Engineering. CRC Press, Boca Raton, im Druck

Bresser, D. et al.: Lithium-Ion Batteries (LIBs) for Medium- and Large-Scale Energy Storage: Current Cell Materials and Components. In: Menictas, C. et al.: Advances in Batteries for Large- and Medium-Scale Energy Storage: Applications in Power Systems and Electric Vehicles. Woodhead, Cambridge 2014, S. 125–211

TEILCHENPHYSIK ZWIESPÄLTIGE STABILITÄT DES NEUTRONS

Das Neutron hat zwei verschiedene Lebensdauern – je nachdem, mit welcher Methode Physiker sie bestimmen. Seit Jahren suchen die Forscher daher nach unentdeckten Fehlerquellen. Unterdessen untermauern neue Experimente lediglich die Diskrepanz und schließen erste, unkonventionelle Erklärungen mit Dunkler Materie aus.

Physiker können Neutronen aus Atomen entfernen, die elektrisch neutralen Kernbauteilchen in einer Art Flasche lagern und zu verschiedenen Zeitpunkten zählen, wie viele noch übrig sind. Dabei stellen sie fest, dass die Lebensdauer eines freien Neutrons im Durchschnitt 14 Minuten und 39 Sekunden beträgt. Andere Wissenschaftler erzeugen Strahlen aus einzelnen Neutronen und messen über den Umweg von Protonen, die beim Zerfall entstehen, einen anderen Wert: 14 Minuten und 48 Sekunden.

Die Diskrepanz zwischen Flaschen- und Strahlexperimenten besteht, seit entsprechende Versuche in den 1990er Jahren erste Ergebnisse lieferten. Zunächst hat das niemanden beunruhigt, denn die Messfehler waren anfangs groß. Doch obwohl sich beide Ansätze technisch stetig verbessert haben, stimmen die Werte noch immer nicht überein (siehe dazu auch »Das Neutronenrätsel«, **Spektrum** Juli 2016, S. 36). Nun haben US-Forscher des Los Alamos National Laboratory in New Mexico die Lebensdauer des Neutrons auf die bislang genaueste Weise bestimmt. Dazu haben sie einen neuen Typ Flasche verwendet, mit dem sie einige mögliche Fehlerquellen früherer Versuche ausschließen konnten. Das Ergebnis löst die Unterschiede zu den Strahlexperimenten jedoch keinesfalls auf, sondern verfestigt sie – denn der neue Wert stimmt mit dem alten überein. Damit steigen die Chancen, dass hinter dem Phänomen unbekannte Naturgesetze stecken.

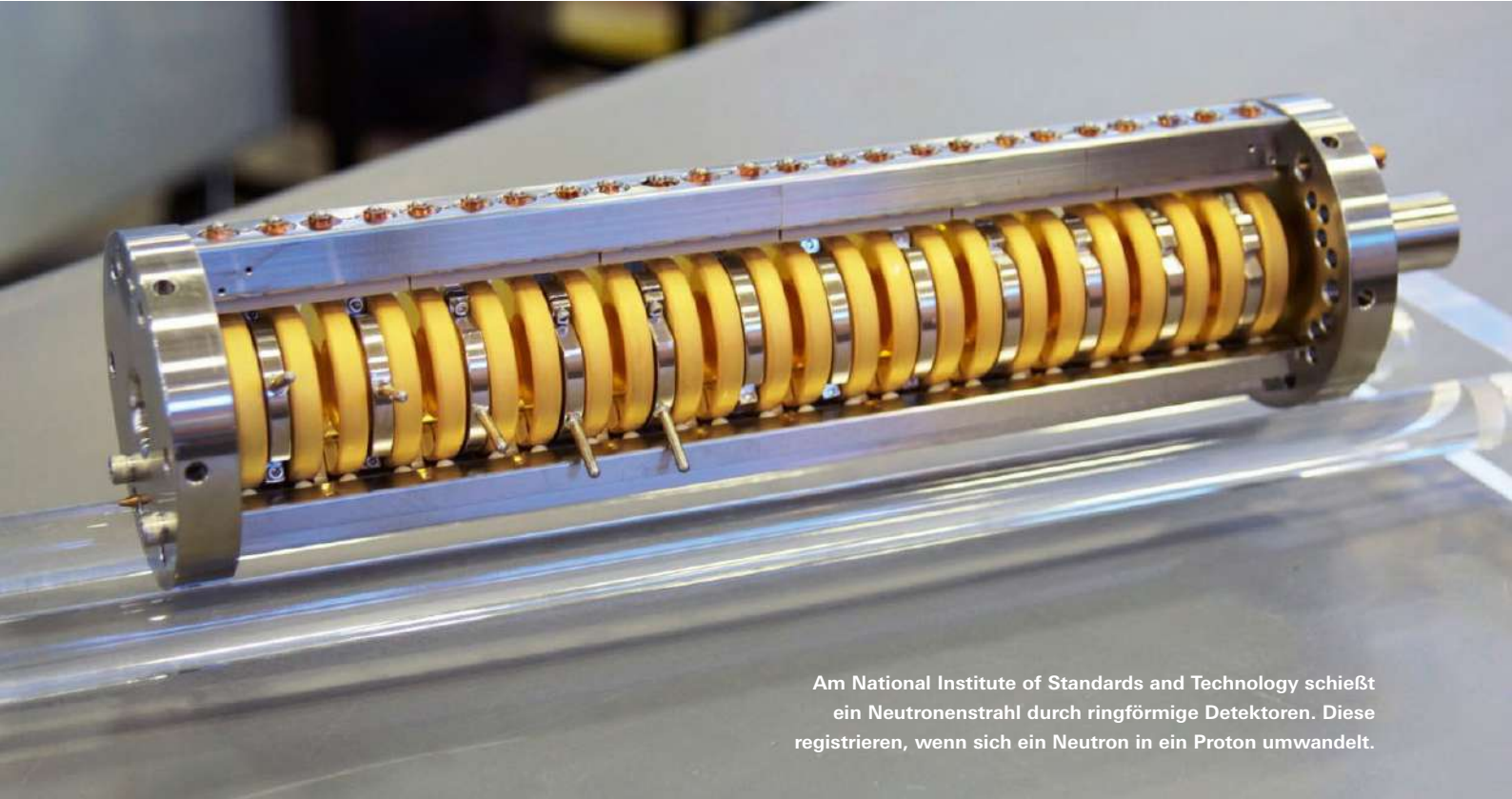
Ein Szenario mit kosmischen Konsequenzen

Aber welche Art neuer Physik? Im Januar 2018 haben die Theoretiker Bartosz Fornal und Benjamin Grinstein von der University of California in San Diego einen unkonventionellen Zerfallsweg des Neutrons als mögliche Ursache in Betracht gezogen. Manchmal könnte es sich in Bestandteile der Dunklen Materie umwandeln, jener unsichtbaren hypothetischen Substanz, die sich im Universum nur indirekt durch ihre Schwerkraft bemerkbar macht. Wenn Neutronen zu Dunkler Materie werden statt zu Protonen, würden sie aus einer Flasche schneller verschwinden, als über den Umweg von Protonen in einem Strahl zu vermuten wäre.

Fornal und Grinstein haben im einfachsten derartigen Szenario für die Teilchen der Dunklen Materie eine Masse zwischen 937,9 und 938,8 Megaelektronvolt ermittelt. Ein Neutron, das in solche Partikel zerfällt, müsste dabei Gammastrahlung einer bestimmten Energie aussenden. In



Beim Experiment UCNTau am Los Alamos National Laboratory speichern Physiker freie Neutronen in einer Flasche und messen, wie lange es dauert, bis die Teilchen zerfallen.



Am National Institute of Standards and Technology schießt ein Neutronenstrahl durch ringförmige Detektoren. Diese registrieren, wenn sich ein Neutron in ein Proton umwandelt.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST)

Experimenten könnten Forscher danach relativ einfach Ausschau halten.

Die Wissenschaftler vom so genannten UCNtau-Experiment in Los Alamos hatten von Fornals und Grinsteins Vorschlag gehört, als sie gerade dabei waren, eine neue Serie von Versuchen vorzubereiten. Die beiden Teammitglieder Zhaowen Tang und Chris Morris verfolgten die Idee, einen Germaniumdetektor an die Flasche zu montieren, um verräterische Gammastrahlen aufzuzeichnen, falls diese tatsächlich beim Zerfall der Neutronen entstehen. Der Aufbau war schnell fertig, und die ersten Ergebnisse ließen nicht lange auf sich warten. Bereits am 7. Februar 2018, nur einen Monat nach Veröffentlichung der Dunkle-Materie-Hypothese, berichteten die UCNtau-Wissenschaftler vorab von ersten Resultaten: Sie waren sich zu 99 Prozent sicher, dass keine derartige Gammastrahlung auftritt. Fornal bringt jetzt ein alternatives Szenario ins Spiel, bei dem ein Neutron in zwei Dunkle-Materie-Teilchen zerfallen könnte statt in eines plus einen Gammablitz. Das jedoch lässt sich nicht mehr so einfach überprüfen.

Dabei wünschen sich viele Physiker, den Streit endlich beizulegen. Denn bei der Frage, ob freie Neutronen nun nach 14 Minuten und 39 Sekunden zerfallen oder nach 14 Minuten und 48 Sekunden, geht es nicht zuletzt um grundlegende kosmologische und teilchenphysikalische Probleme.

Einerseits wirkt sich die Lebensdauer auf die Produktionsraten von Atomen aus. »Das Gleichgewicht zwischen

Wasserstoff und Helium ist entscheidend für die Dynamik des Urknalls, wie wir ihn heute verstehen«, erläutert Geoffrey Greene von der University of Tennessee und dem Oak Ridge National Laboratory. »Außerdem hat es Konsequenzen für die Sternentstehung im Lauf der nächsten Milliarden Jahre.«

Andererseits bestehen Neutronen, ebenso wie Protonen, aus so genannten Quarks, die von weiteren Elementarteilchen namens Gluonen zusammengehalten werden. Beim Zerfall eines Neutrons wandelt sich ein Quark in ein anderes um. Solange Physiker hier keinen genauen Wert haben, fehlt ein wichtiger Gradmesser dafür, wie gut sie solche fundamentalen Wechselwirkungen tatsächlich verstehen.

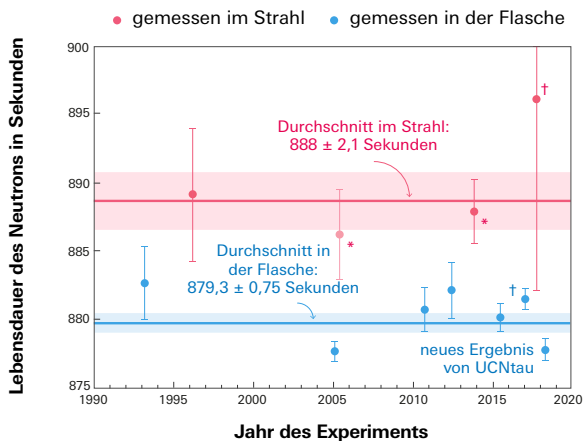
Ausgefeilte Detektoren – und ratlose Experten

Darum würden Forscher die neun Sekunden Differenz gern beseitigen und durch einen eindeutigen Wert ersetzen. Doch die Ursache für den Unterschied liegt völlig im Dunkeln, resümiert Greene, ein Veteran der Strahlexperimente: »Jeder von uns hat jedes jemals durchgeführte Experiment gründlich analysiert. Hätten wir einen Ansatz gefunden, würden wir sofort versuchen, die Schwierigkeiten zu lösen.«

Erstmals machte sich das Problem 2005 statistisch gesehen bemerkbar, als eine russische Arbeitsgruppe um Anatoli Serebrov vom Petersburg Nuclear Physics Institute sowie US-Physiker vom National Institute of Standards

Deutliche Diskrepanz

Als Bestandteil eines Atomkerns sind Neutronen stabil, doch sobald sie daraus entfernt werden, zerfallen die Teilchen. Das dauert durchschnittlich weniger als eine Viertelstunde, doch bei der Bestimmung des genauen Werts liefern zwei verschiedene Arten von Experiment klar voneinander abweichende Ergebnisse.



* Ein Wert von 2005 wurde 2013 durch den eines verbesserten Versuchsaufbaus ersetzt.

† vorläufige Ergebnisse

and Technology (NIST) in Maryland ihre Ergebnisse von Flaschen- beziehungsweise Strahl experimenten veröffentlichten. Die jeweils sehr genauen Messungen – bei der Flasche betrug die Abweichung eine Sekunde, beim Strahl drei – lagen acht Sekunden auseinander. Viele Verbesserungen, unabhängige Prüfungen und Diskussionen mit rauchenden Köpfen später hat sich die mittlere Lücke zwischen allen durchgeführten Experimenten geringfügig auf neun Sekunden vergrößert, während die Fehlergrenzen kleiner geworden sind (siehe »Deutliche Diskrepanz«, oben). Peter Geltenbort vom Institut Laue-Langevin, der 2005 im Team von Serebrov war und nun Teil des UCNTau-Experiments ist, sieht zwei mögliche Erklärungen: »Entweder steckt wirklich exotische, neue Physik dahinter, oder alle haben die Genauigkeit ihrer Messungen überschätzt.«

Die Experten am NIST und anderswo haben viel Arbeit investiert, um die zahlreichen Störquellen ihres Versuchs zu verstehen, von der Intensität des Neutronenstrahls bis hin zum Volumen und der Effizienz des Detektors. Greene hatte viele Jahre besonders dem Strahl experiment miss- vertraut, doch inzwischen räumt er ein: »Im Moment wüsste ich nicht, welcher konkrete systematische Effekt übersehen worden sein könnte.«

Bei den Neutronenflaschen wiederum hatten Wissenschaftler lange vermutet, Teilchen würden vielleicht von den Wänden des Behälters eingefangen, obwohl diese mit

speziellen reflektierenden Materialien beschichtet und mögliche Verluste durch den Vergleich verschieden großer Flaschen herausgerechnet wurden. Alternativ hätte sich die Methode zum Zählen der Neutronen als fehlerhaft herausstellen können.

Das hat sich mit dem neuen UCNTau-Experiment erledigt. Statt in einer realen Flasche haben die Physiker in Los Alamos die Neutronen in magnetischen Feldern festgehalten, während sie den Zerfall abwarteten. Anschließend wurden die übrig gebliebenen Neutronen nicht zu einem externen Detektor überführt, sondern in der Magnetflasche selbst registriert. Dazu senkten die Forscher einen Absorber hinein, der die Neutronen aufso und dabei Lichtblitze produzierte. Das neue Resultat bestätigt das alte.

Konkurrenz zwingt zur Ehrlichkeit

Mangels Alternativen können die Physiker nur weitermachen und hoffen. Das UCNTau-Team nimmt mehr Daten und zielt auf eine Unsicherheit von lediglich 0,2 Sekunden ab. Am NIST erwarten die Forscher bis 2020 genügend Messwerte, um auf eine Sekunde genau zu sein. In Japan führen Kollegen ein Experiment an einem J-PARC genannten Forschungskomplex durch. Und wenn die Ergebnisse dann immer noch nicht übereinstimmen, wird die Saga weitergehen.

Greene hebt die positiven Seiten zweier vollkommen unabhängiger Methoden hervor: »Erst dieses Spannungsfeld treibt die Verbesserungen bei den Aufbauten an.« Hätten Physiker zu früh ausschließlich auf eine der beiden Techniken gesetzt, stünde heute in der Literatur womöglich widerspruchlos ein falscher Wert für die Lebensdauer des Neutrons. »Das zwingt uns zur Ehrlichkeit. An meiner alten Arbeitsstelle am National Bureau of Standards hatten wir so eine Redensart: Hat man eine Uhr, weiß man, wie spät es ist. Hat man zwei, kann man sich nie sicher sein.«

Natalie Wolchover ist Physikerin und schreibt regelmäßig für das »Quanta Magazine«.

QUELLEN

Fornal, B., Grinstein, B.: Dark Matter Interpretation of the Neutron Decay Anomaly. <https://arxiv.org/abs/1801.01124>

Pattie, R. W. Jr. et al.: Measurement of the Neutron Lifetime Using an Asymmetric Magneto-Gravitational Trap and in Situ Detection. <https://arxiv.org/abs/1707.01817>

Tang, Z. et al.: Search for the Neutron Decay $n \rightarrow X + \gamma$ where X is a Dark Matter Particle. <https://arxiv.org/abs/1802.01595>

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Neutron Lifetime Puzzle Deepens, but No Dark Matter Seen« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

VULKANOLOGIE

CHEMISCHER TIPPING POINT BESTIMMT AUSBRUCHSVERHALTEN

Die Explosivität vulkanischer Eruptionen unterscheidet sich je nach der Fließeigenschaft des Magmas. Forscher haben nun herausgefunden, dass dieses durch kleinste Änderungen der chemischen Zusammensetzung schlagartig zähflüssiger wird.

Unter dem Vulkan Yellowstone im gleichnamigen Nationalpark befindet sich eine riesige Magmakammer, die Schätzungen zufolge 900 Kubikkilometer Gesteinsschmelze enthält – rechnerisch genug, um ganz Deutschland mit einer über zwei Meter dicken Lavaschicht zu bedecken. Ob in Zeitungsartikeln, Reportagen oder Katastrophenfilmen wie »2012« oder »Supervulkan«, immer geht es um die Frage, wann Yellowstone das nächste Mal ausbrechen wird. Untermalt werden diese Beiträge gerne mit Bildern von gigantischen Rauchsäulen und Aschewolken, die halb Nordamerika buchstäblich in Schutt und Asche versinken lassen. Tatsächlich ist das Risiko einer solch gewaltsamen Eruption allerdings gering: Wissenschaftler des United States Geological Survey beziffern die Wahrscheinlichkeit auf weniger als eins zu einer Million. Nur dreimal kam es in den letzten zwei Millionen Jahren zu explosiven Ausbrüchen. Dabei schleuderte der Vulkan jeweils riesige Mengen Magma heraus und formte imposante Krater, so genannte Calderen. Die letzte große explosive Eruption ereignete sich vor ungefähr 630 000 Jahren und schuf die 80 Kilometer lange und 55 Kilometer breite Yellowstone-Caldera, deren steile Wände man heute im Nationalpark bestaunen kann.

Weniger Sprengkraft durch Sprudeleffekt

Sehr viel häufiger als solche explosiven Ausbrüche sind in Yellowstone jedoch effusive Eruptionen, die Lavaströme oder Lavadome bilden. Mehr als 30 Lavaströme sind allein seit jener Supereruption vor 630 000 Jahren entstanden. Die größten unter ihnen bedecken eine Fläche von bis zu 350 Quadratkilometern. Heute würde langsam austretende Lava zwar einen Teil des Nationalparks zerstören, hätte aber längst nicht so verheerende Folgen für den Rest des Landes. Ein Ausfließen von Lava an der Erdoberfläche tritt vor allem dann auf, wenn die Gesteinsschmelze verhältnismäßig dünnflüssig ist und die darin enthaltenen Gase leicht austreten können – in zäheren Schmelzen bleiben sie gefangen. Sinkt der auf dem Magma lastende Druck, wenn dieses zur Oberfläche aufsteigt, entstehen Gasblasen, und das Magma beginnt aufzuschäumen – wie beim schnellen Öffnen einer Sprudelflasche, die man zuvor geschüttelt hat.

FOTO: DANILLO DI GENOVA, UNIVERSITY OF BRISTOL



Die Forscher experimentierten mit bis zu 1000 Grad heißen Gesteinsschmelzen.

In Yellowstone treten jedoch sowohl bei explosiven als auch bei effusiven Ausbrüchen sehr zähflüssige, silikatreiche Gesteinsschmelzen aus, so genannte rhyolithische Magmen. Geologen rätseln seit Langem, warum Magmen, die scheinbar die gleiche Viskosität (Zähigkeit) aufweisen, so unterschiedliche Eruptionsarten bedingen.

Wissenschaftler um den experimentellen Vulkanologen Danilo Di Genova von der University of Bristol berichten nun von einer möglichen Ursache. Die Forscher konnten in Viskositätsexperimenten zeigen, dass bereits kleine Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Schmelze großen Einfluss auf die Zähflüssigkeit von Magma haben. Für die Versuche stellten sie verschiedene synthetische Gläser her, die der gesamten Bandbreite an Rhyolithmagmen des Yellowstone entsprachen. Anschließend zermahlten sie jedes der Gläser zu Pulver und erhitzen dieses in einem Ofen. Bei für Magma typischen Temperaturen von 700 bis 1000 Grad Celsius entstanden Schmelzen, deren Zähigkeit die Forscher bestimmten. Die spezifische Viskosität einer Gesteinsschmelze ergibt sich aus dem Widerstand, der auf einen in der Schmelze rotierenden Metallstab wirkt. Man kann das mit einem Kuchenteig vergleichen: Je zäher der Teig ist, desto mehr Kraft muss man aufwenden, um ihn zu rühren.

Die Unterschiede in der Viskosität von Gesteinsschmelzen resultieren aus ihrer einzigartigen Struktur auf molekularer Ebene. In einer Schmelze sind die Atome nicht so regelmäßig angeordnet wie in einem Kristall, dennoch gehen sie Bindungen miteinander ein. Diese beeinflussen die physikalischen Eigenschaften des Magmas. Die meisten Gesteinsschmelzen bestehen zu mehr als 50 Prozent aus Silizium und Sauerstoff, die pyramidenförmige Tetraeder bilden, in denen sich je vier Sauerstoffatome um ein Siliziumatom anordnen. Benachbarte Tetraeder teilen sich jeweils ein so genanntes brückenbildendes Sauerstoffatom

und bilden so ein Netzwerk aus diversen Ketten und Ringen, die lose aneinanderhängen. Je stabiler dieses Netzwerk ist, umso viskoser ist das Schmelze. Elemente wie Silizium, Aluminium oder dreiwertiges Eisen können in das Netzwerk integriert werden, man bezeichnet sie deshalb als Netzwerkbildner, andere häufig enthaltene Elemente wie Natrium, Kalium, Kalzium, Magnesium oder zweiwertiges Eisen lassen sich dagegen nicht in den Kettenverbund integrieren und gelten als Netzwerkmodifizierer. Die Viskosität einer Schmelze hängt somit im Wesentlichen davon ab, in welchem Verhältnis netzwerkmodifizierende und netzwerkbildende Elemente vorliegen: Je höher der Anteil an Netzwerkmodifizierern, desto geringer ist die Viskosität des Magmas und desto leichter fließt es.

Basierend auf dem Verhältnis der beiden Typen von Elementen errechneten die Forscher in der neuen Studie einen rheologischen Index. Unterhalb eines bestimmten Werts stieg die Viskosität der untersuchten Schmelzen sprunghaft an. Anhand thermodynamischer Modellierungen konnten sie im Weiteren zeigen, dass die Anreicherung

mit Silikat – eine für Magma typische chemische Entwicklung – zu einem niedrigeren rheologischen Index führt. Wenn Magma abkühlt, bilden sich Kristalle verschiedener Minerale, die eine andere elementare Zusammensetzung haben als die Schmelze, in der sie wachsen. Während die Kristallisation einige Elemente kontinuierlich aus der Schmelze entfernt und sie in den Mineralen anreichert, steigt der Anteil anderer Elemente im flüssigen Magma, wie bei einer Destillation. Geochemiker sprechen hierbei von fraktionierter Kristallisation. Die Versuchsergebnisse und die Modellberechnungen legen nahe, dass bei diesem Prozess der rheologische Index der verbliebenen Schmelze an einen Kippunkt (tipping point) gelangen kann, an dem die Viskosität des Magmas schlagartig zunimmt.

Neben der Kristallisation gibt es weitere magmatische Prozesse, die womöglich bewirken, dass die chemische Zusammensetzung den kritischen Schwellenwert erreicht, an dem die Schmelze plötzlich zähflüssiger zu werden scheint. Das Phänomen könnte zum Beispiel auftreten, wenn sich Magmen unterschiedlicher Zusammensetzung mischen; oder wenn Magmareservoir bestimmte Elemente mit dem umgebenden Gestein in der Erdkruste austauschen. Dieser chemische Kippunkt, so die Forscher, ist vielleicht der Schlüssel für die mal effusiven und mal explosiven Ausbrüche des Yellowstone und anderer rhyolitischer Vulkansysteme.

Apokalypse oder doch nur ein spektakulärer Lavafloss? Allerdings könnten noch weitere Parameter, die nicht Gegenstand der Studie waren, für das Ausbruchverhalten entscheidend sein. So spielt beispielsweise der Gehalt an flüchtigen Komponenten wie Wasser oder Kohlenstoffdioxid eine große Rolle für die Viskosität; ebenso der Oxidationszustand des Magmas, der das Verhältnis von zweiwertigem zu dreiwertigem Eisen in der Schmelze kontrolliert. Die Mehrzahl dieser Faktoren haben Wissenschaftler bisher nur für einen kleinen Teil der vulkanischen Ablagerungen in Yellowstone analysiert. Bei anderen wiederum ist nicht abschließend geklärt, wie sie die Zähigkeit beeinflussen; das betrifft etwa die Menge und die Form von Kristallen und Gasblasen im Magma.

Gut möglich also, dass zukünftige Studien zusätzliche Faktoren identifizieren werden, die bestimmen, ob es beim nächsten Ausbruch des Yellowstone zur apokalyptischen Explosion kommt oder sich lediglich ein gewaltiger Lavaström in den Nationalpark ergießt.

Juliana Troch promoviert in Vulkanologie an der ETH Zürich.

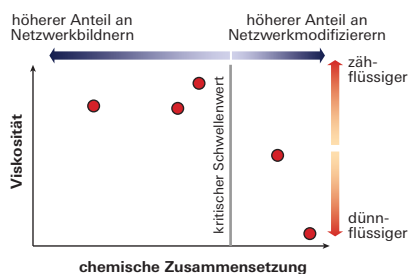
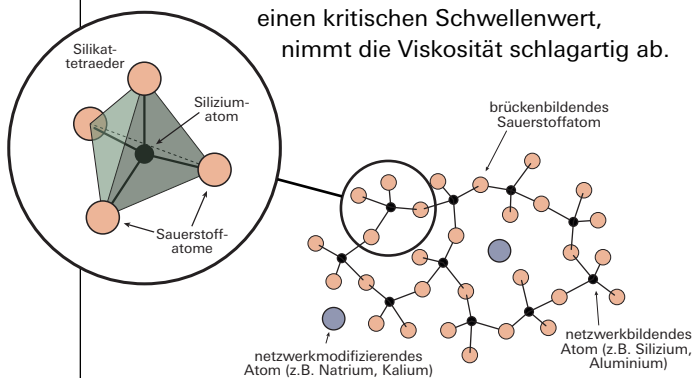
QUELLEN

Christiansen, R. L. et al.: Preliminary Assessment of Volcanic and Hydrothermal Hazards in Yellowstone National Park and Vicinity. In: USGS Open-File Report, U.S. Geological Survey, 2007

Di Genova, D. et al.: A Compositional Tipping Point Governing the Mobilization and Eruption Style of Rhyolitic Magma. In: Nature 552, S. 235–238, 2017

Viskosität von Magma

Magma besteht größtenteils aus Silikat. Die tetraedrischen Moleküle sind über Sauerstoffatome lose miteinander verbunden. So genannte Netzwerkbildner stabilisieren die Verknüpfungen und produzieren hochviskose (zähflüssige) Gesteinsschmelzen. Netzwerkmodifizierer hingegen wirken destabilisierend und lassen Magma schneller fließen. Übersteigt ihr Anteil einen kritischen Schwellenwert, nimmt die Viskosität schlagartig ab.



MEDIZIN IST TRISOMIE 21 EINE IMMUNSTÖRUNG?

Neue Untersuchungen zeigen, dass Menschen mit Down-Syndrom deutlich veränderte Proteinspiegel im Blut haben. Betroffen sind vor allem Eiweiße, die Schlüsselfunktionen in der Körperabwehr ausüben.

► Menschen mit Down-Syndrom besitzen infolge einer Genommutation das gesamte 21. Chromosom oder Teile davon dreifach statt zweifach. Daher bezeichnet man das Syndrom auch als »Trisomie 21«. Es ist die häufigste Chromosomenanomalie beim Menschen; etwa eines von 700 Neugeborenen kommt damit auf die Welt. Die Betroffenen leiden oft unter organischen Schäden; ihre kognitiven Fähigkeiten sind in der Regel eingeschränkt.

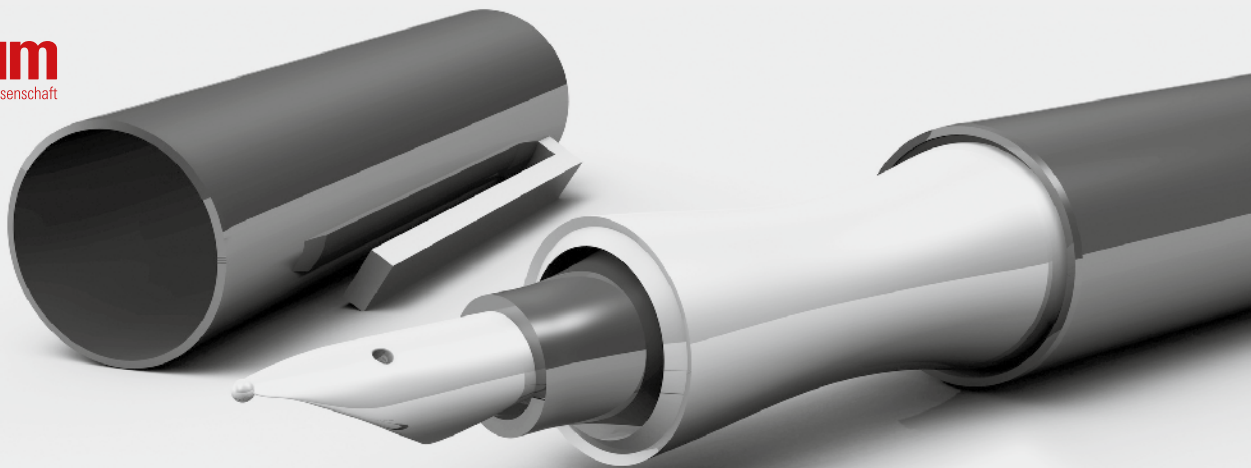
Seit Jahren ist bekannt, dass sich Down-Patienten hinsichtlich ihrer Anfälligkeit für bestimmte Krankheiten klar von anderen Menschen unterscheiden. Sie neigen stärker zu Autoimmunerkrankungen und sind deshalb überdurchschnittlich oft von Diabetes Typ 1, entzündlichen Gelenkerkrankungen, Zöliakie (Glutenunverträglichkeit)

oder einer chronischen Entzündung der Schilddrüse betroffen. Auch Krebserkrankungen des Blut bildenden oder des lymphatischen Systems treten bei ihnen gehäuft auf. Andererseits leiden sie deutlich seltener unter soliden Tumoren – also solchen, die an einem festen Ort im Körper sitzen. Lungen-, Brust-, Haut- und Gebärmutterhalskrebs kommen bei Menschen mit Down-Syndrom weniger häufig vor als in der Allgemeinbevölkerung.

Mediziner rätseln seit Jahren, was die Ursache dafür sein mag. Nun haben Forscher um Thomas Blumenthal von der University of Colorado eine überraschende Antwort gefunden. Ihre Forschungen deuten darauf hin, dass Trisomie 21 in erster Linie eine Störung des Immunsystems ist. Die fehlregulierte Körperabwehr schädigt demnach Organe und das Gehirn – und ruft so das bekannte Erscheinungsbild des Down-Syndroms hervor. Möglicherweise hilft diese Erkenntnis dabei, die Patienten künftig wirksamer zu behandeln.

Blumenthal und seine Kollegen untersuchten, welche Eiweißstoffe im Blut von Down-Betroffenen zirkulieren, und verglichen dies mit den Werten bei normalem Chromosomensatz. Hierfür nutzten die Forscher eine Technik, die Proteine mit Hilfe von »Aptameren« nachweist – kurzen Nukleinsäurestücken, die zielgerichtet an bestimmte Moleküle binden. So konnten die Wissenschaftler in den Blutproben von insgesamt 263 Menschen jeweils

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

tausende Proteine nachweisen. 165 Teilnehmer der Studie wiesen das Down-Syndrom auf, die übrigen nicht.

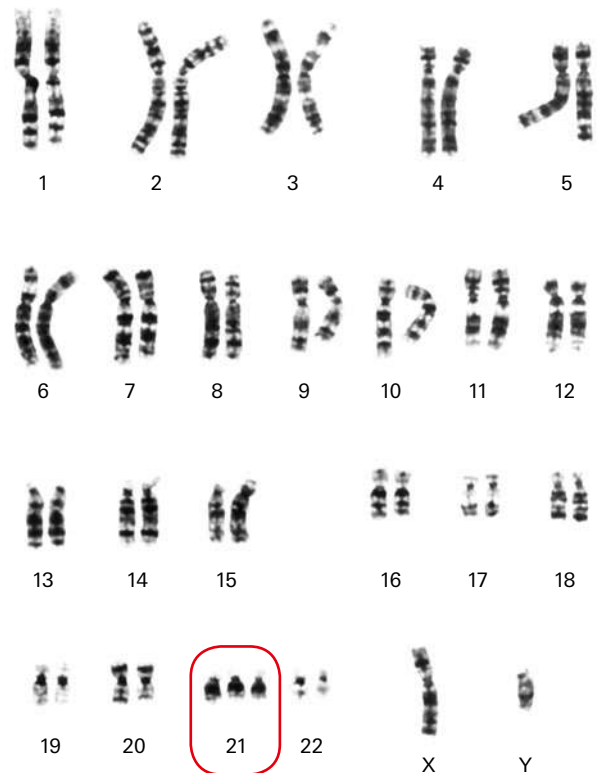
Die Analyse ergab, dass sich die beiden Gruppen hinsichtlich ihrer Proteinspiegel deutlich unterschieden. Mindestens 200 Eiweißstoffe kamen bei Down-Betroffenen entweder häufiger oder seltener vor als bei den anderen. Besonders auffällig: Mehrere Proteine, deren Gene auf Chromosom 21 verortet sind, ließen sich bei ihnen in wesentlich größeren Mengen nachweisen. Menschen mit Trisomie 21 besitzen von den Genen, die dort liegen, drei statt zwei Kopien, weshalb ihr Organismus auch mehr zugehörige Genprodukte herstellen sollte.

Überaktive Masterregulatoren beeinflussen zahlreiche Immunprozesse

Einige dieser Proteine üben Schlüsselfunktionen in der Körperabwehr aus, indem sie als »Masterregulatoren« über diverse Signalwege viele Immunprozesse steuern. Zu ihnen gehören vier so genannte Interferon-Rezeptoren. Werden sie auf Grund des überzähligen Chromosoms 21 vermehrt hergestellt, neigt das Immunsystem zu überschießenden Reaktionen, die sich zu Autoimmunerkrankungen entwickeln können. Andererseits könnte die überaktive Körperabwehr daran mitwirken, dass Down-Betroffene seltener an soliden Tumoren leiden: Aus der Krebsimmuntherapie ist bekannt, dass eine Entfesselung des Immunsystems zur Rückbildung bösartiger Wucherungen führen kann. Blutkrebs wiederum tritt bei ihnen vielleicht deshalb häufiger auf, weil ihr Organismus diverse Wachstumsfaktoren beziehungsweise deren Rezeptoren in veränderten Mengen herstellt, wie die Daten zeigen.

Von den mindestens 200 Proteinen, die beim Down-Syndrom in veränderter Konzentration vorliegen, wirkt etwa jedes zweite an der Kontrolle des Immunsystems mit. So spielt Beta-2-Mikroglobulin, eine Untereinheit des Haupthistokompatibilitätskomplexes I, eine wichtige Rolle beim Bekämpfen körperfremder Strukturen und tritt im Blut von Trisomie-21-Betroffenen vermehrt auf. Der Antikörper Immunglobulin E wiederum wirkt an der Parasitenabwehr und an Allergien mit. Sein Blutspiegel erwies sich bei Menschen mit Down-Syndrom als deutlich vermindert.

Wie die Untersuchung belegt hat, sind bei Down-Betroffenen die Konzentrationen mehrerer entzündungsfördernder Proteine erhöht. Dazu gehören Interleukin-6 und -22, CCL2 sowie der Tumornekrosefaktor (TNF-alpha). Moleküle wiederum, die das Immunsystem eher dämpfen, werden in geringeren Mengen gebildet, etwa LILRB-Proteine (Leukozyten-Immunglobulin-ähnliche Rezeptoren der Unterfamilie B). Diese Veränderungen fördern eine überaktive Immunabwehr und verstärken die Neigung zu Autoimmunreaktionen. Aus früheren Studien ist bekannt, dass etliche Proteine, deren Blutspiegel bei Trisomie 21 verändert ist, mit Autoimmunerkrankungen und chronisch-entzündlichen Prozessen in Zusammenhang stehen – unter anderem mit chronischen Schilddrüsenerkrankungen, rheumatoider Arthritis, Schuppenflechte (Psoriasis), Diabetes Typ 1 und chronisch-entzündlichen Darmkomplikationen.



Menschen mit Down-Syndrom besitzen infolge einer Genommutation das gesamte 21. Chromosom oder Teile davon dreifach statt zweifach.

Eine weitere Klasse von Eiweißstoffen, die beim Down-Syndrom in veränderten Konzentrationen auftreten, sind die Proteine des so genannten Komplementsystems. Sie zirkulieren im Blutkreislauf und dienen der Abwehr eindringender Fremdstoffe, beispielsweise Mikroorganismen, können aber auch Körperzellen zerstören und Gewebeschäden verursachen, etwa bei der Autoimmunerkrankung Schmetterlingsflechte. Blumenthal und sein Team haben nachgewiesen, dass der Blutplasmagehalt vieler dieser Proteine bei Trisomie 21 vermindert ist. Das könnte der Grund sein, warum die Betroffenen häufiger an Lungen- und Mittelohrentzündungen sowie an Nierenkomplikationen leiden. Auch gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Komplementsystem und neurodegenerativen Störungen. Mehrere Bestandteile des Komplementsystems wirken daran mit, Hirnsynapsen zu zerstören, während sich ein Alzheimersyndrom ausprägt – daher vermuten die Forscher, dass die Alzheimerkrankheit bei Down-Betroffenen anders fortschreitet.

Die veränderten Immunfunktionen sind vielleicht auch der Grund für die kognitiven Beeinträchtigungen, die mit dem Down-Syndrom häufig einhergehen. Das jedenfalls vermuten die Forscher um Blumenthal. Ihr Argument: Sind die Mikroglia, die Immunzellen des Gehirns, dauerhaft überaktiv, können sie andere Hirnzellen schädigen, beispielsweise Neurone. Im Gehirn von Trisomie-21-Betroffenen gebe es starke Hinweise auf hochaktive Mikroglia und entzündliche Prozesse, sagt Joaquin Espinosa, einer der beteiligten Wissenschaftler. Das trage möglicherweise zum Untergang von Nervenzellen, zu den kognitiven

Defiziten und einem erhöhten Alzheimerisiko bei. Negativ könnte sich zudem auswirken, dass mehrere Proteine, die für die Neurogenese wichtig sind, bei Trisomie 21 schwächer ausgeprägt werden, wie die Daten zeigen.

Allerdings muss man bei solchen Schlüssen Vorsicht walten lassen, betont Albert Sickmann, Leiter des Leibniz-Instituts für Analytische Wissenschaften (ISAS). Bei den Untersuchungen von Blumenthal und seinen Kollegen handle es sich um eine typische Discovery-Studie – also eine, die ganz am Anfang stehe, wenn man nach Proteinen mit diagnostischer oder therapeutischer Aussagekraft suche. Der wesentlich langwierigere Teil stehe noch bevor, nämlich die Validierung der Ergebnisse und die Entwicklung neuer klinischer Testverfahren daraus. »Weltweit arbeiten viele Forscher an Verfahren zur Proteinbestimmung, die sich diagnostisch oder therapeutisch einsetzen lassen«, sagt Sickmann. »Man versucht das bei sehr vielen Arten von Erkrankungen.« Proteomanalysen könnten häufig mehr über den Zustand von Zellen und Geweben aussagen als Genomuntersuchungen, weil Proteine – im Gegensatz zu genetischen Mutationen – direkt auf physiologische Vorgänge einwirken.

Arthritis-Medikamente gegen das Down-Syndrom

Es gibt heute schon Arzneistoffe, die Interferon-Signalwege unterbrechen, so genannte Januskinase-Inhibitoren. Mediziner setzen sie unter anderem ein, um rheumatoide Arthritis oder Schuppenflechte zu behandeln, bei denen Autoimmunprozesse eine Rolle spielen. Blumenthal und seine Kollegen möchten untersuchen, ob sich mit solchen Arzneimitteln auch die Symptome des Down-Syndroms behandeln lassen. Eine nicht unbegründete Hoffnung, bestätigt der Humangenetiker Wolfram Henn von der Universität des Saarlandes: »Die interessante Studie gibt durchaus Ansatzpunkte für Therapiestrategien.«

Jedoch, betont Henn, dürfe man vom Erforschen der molekularen Mechanismen des Down-Syndroms keine therapeutischen Wunder erwarten. Infolge der Chromosomenanomalie prägten sich schon während der vorgeburtlichen Organentwicklung Veränderungen aus, die zum Zeitpunkt der Geburt nicht mehr umkehrbar seien, beispielsweise bei der Bildung der Herzhöhlen. Was aber nicht von der Pflicht entbinde, den Betroffenen auf medizinischer Ebene optimale Lebensperspektiven zu geben und an deren Verbesserung zu arbeiten.

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

QUELLEN

Burke, K. L.: Down Syndrome, the Immune System Disorder. In: *American Scientist* 106, S. 11–12, 2018

Hasle, H. H. et al.: Low Risk of Solid Tumors in Persons with Down Syndrome. In: *Genetics in Medicine* 18, S. 1151–1157, 2016

Sullivan, K. D. et al.: Trisomy 21 Causes Changes in the Circulating Proteome Indicative of Chronic Autoinflammation. In: *Scientific Reports* 7, 14818, 2017



JAHRGANGS-CD-ROM 2017

JAHRGANGS-CD-ROM
Spektrum
der Wissenschaft
2017
12 Ausgaben: Jan
Register: 1978-
mit über 1300
Spektrum

JAHRGANGS-CD-ROM
Spektrum
der Wissenschaft
2017
12 Hefte 1–12/2017
Register 1978–2017
Onlineartikel
1997–2017
2018 © **Spektrum** der Wissenschaft
Verlagsgesellschaft mbH
ISSN 0173-3559/18-8

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

Tel. 06221 9126-743
www.spektrum.de/sammeln
service@spektrum.de



SPRINGERS EINWÜRFE LANDWIRTSCHAFT UND DATENHUNGER

Eine Langzeitstudie aus China führt modellhaft vor, dass ein riesiger Agrarsektor zugleich effizient und nachhaltig wirtschaften kann. Das Geheimnis: umfassende Information.

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

► spektrum.de/artikel/1555474

Wie lässt sich eine Weltbevölkerung ernähren, die zum Ende dieses Jahrhunderts auf zehn Milliarden Menschen anwachsen wird? Gewiss nur mit intensiver Landwirtschaft. Doch führt die nicht unweigerlich zu anfälligen Monokulturen, Überdüngung und Bodenerosion? Kann eine ausreichende Nahrungsproduktion also überhaupt nachhaltig funktionieren?

Eine Untersuchung von chinesischen Agronomen um Zheming Cui von der Landwirtschaftlichen Universität Chinas in Peking weckt Hoffnungen. Das Ausmaß der Studie ist beispiellos: Sie dauerte zehn Jahre, von 2005 bis 2015, und erfasste fast zehn Prozent der 200 bis 300 Millionen bäuerlichen Kleinbetriebe, die im heutigen China jeweils einige Hektar bewirtschaften (*Nature 555*, S. 363–366, 2018).

Chinas Kleinbauern düngen exzessiv. Sie setzen viermal so viel Stickstoffdünger ein wie im weltweiten Durchschnitt, erzielen damit aber im globalen Vergleich nur halb so viel Wirkung. Wie die Autoren der Studie betonen, hat das auf Dauer katastrophale Folgen: Die Böden versauern, die Gewässer werden verseucht, und Unmengen von Treibhausgasen gelangen in die Atmosphäre.

Der erste Schritt zu einem evidenzbasierten Verfahren, das zugleich Effizienz und Nachhaltigkeit erhöhen sollte, war umfassendes Datensammeln. Zu diesem Zweck entstand in China ein riesiges Netzwerk, das 1200 Agrarexperten, 65 000 lokale Beamte, 140 000 Industrievertreter und 21 Millionen Bauern einspannte. Die gewonnenen Informationen gaben Auskunft, wie Bewässerung, Pflanzendichte und Samentiefe die Produktivität beeinflussen.

Im zweiten Schritt wurden aus den Daten lokal angepasste Empfehlungen hergeleitet und den vernetzten Bauern zur Verfügung gestellt. Ein Beispiel: Im wasserreichen Süden Chinas lässt sich Reis viel dichter anbauen, als die Bauern traditionell gewohnt waren.

Die Resultate der chinesischen Langzeitstudie sind spektakulär: Die Ausbeuten an Mais, Reis und Weizen stiegen im fraglichen Jahrzehnt jeweils um rund 11 Prozent, während der Verbrauch von Düngemitteln im selben Zeitraum je nach Ernteprodukt zwischen 15 und 18 Prozent abnahm. Die Bauern gaben weniger Geld aus, nahmen mehr ein und wirtschafteten umweltfreundlicher. Diese Effekte bestehen nach dem Ende der Studie weiter.

Wohlgemerkt, die Fortschritte wurden nicht durch staatliche Vergabe materieller Hilfen erzielt – etwa Düngemittel, Landmaschinen und Traktoren –, sondern durch Sammeln und Mitteilen wissenschaftlicher Daten über lokale Bedingungen und agrarische Bedürfnisse.

So wie in China dominieren in Indien und im subsaharischen Afrika bäuerliche Kleinbetriebe die Landwirtschaft. Allerdings fehlt dort sowohl eine gut entwickelte Infrastruktur als auch eine öffentliche Hand, die im Prinzip alle Informationen zusammenträgt. Dennoch könnten agrarwissenschaftliche Datennetze in solchen Regionen Effizienz und Nachhaltigkeit steigern, wenn auch zunächst wohl nur auf lokaler Ebene. Das positive Beispiel würde aber vielleicht ansteckend wirken und am Ende im besten Fall ganze Staaten erfassen.

Chinas Agrarsektor hat eine extrem bewegte Geschichte hinter sich. Der unter Mao 1958 ausgerufene »Große Sprung nach vorn« scheiterte; das Experiment einer Kollektivierung der Landwirtschaft bei gleichzeitig dezentraler Industrialisierung endete mit einer der größten Hungersnöte der Geschichte. Dafür vermochte China in der postmaoistischen Ära binnen 30 Jahren 800 Millionen Menschen aus Hunger und Armut zu befreien. Nun könnte der groß angelegte Versuch, lokale Landwirtschaftsbetriebe in ein zentrales Informationsnetz einzubinden, als Modell zur Lösung des globalen Nahrungsproblems dienen.

Spektrum LIVE

VERANSTALTUNGSREIHE ZUM
40-JÄHRIGEN JUBILÄUM DES VERLAGS
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Workshop Teilchenphysik für jedermann

Wann? 25. Mai 2018, 10.00–18.00 Uhr

Wo? Institut für Physik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Unter der Leitung von Professor Matthias Schott konstruieren und betreiben die Teilnehmer einen eigenen Detektor und weisen kosmische Höhenstrahlung nach. Spezielle Vorkenntnisse sind nicht erforderlich.

Vortrag Der Ursprung des Lebens auf der Erde

Wann? 8. Juni 2018, 20.00 Uhr

Wo? LICHTHOF Theater, Hamburg

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

Tickets und Anmeldungen:

Spektrum.de/live

SCHWANGERSCHAFT UNSER ERSTES ORGAN

MONET/MOUTRIE

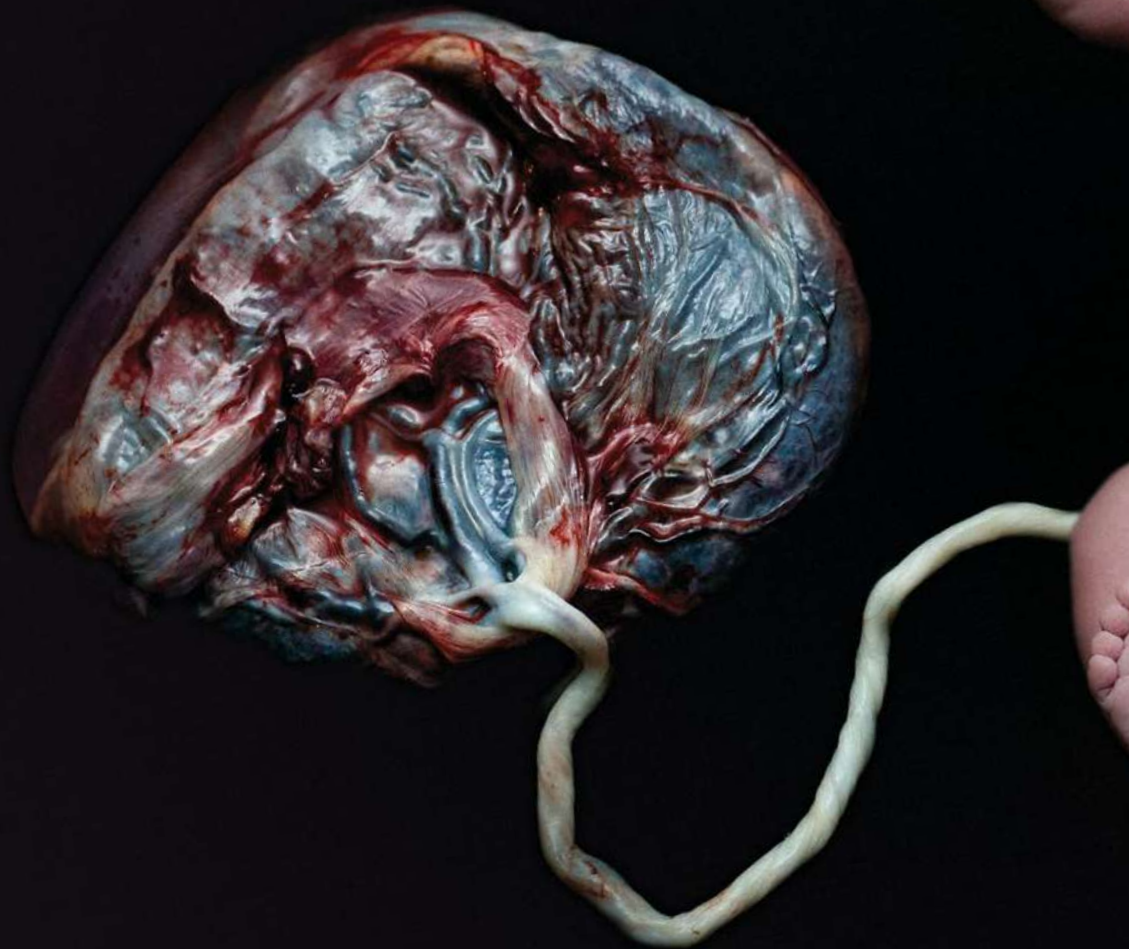
Keines unserer Organe ist weniger erforscht als die Plazenta. Neue Erkenntnisse bergen manche Überraschung.



Adrian Erlebacher hat an der medizinischen Fakultät der University of California in San Francisco eine Professur in der Abteilung für Labormedizin. Er untersucht an Mäusen, wie der Uterus die Plazenta immunologisch toleriert. **Susan J. Fisher** ist an derselben Fakultät Professorin in der Abteilung Geburtshilfe, Gynäkologie und Fortpflanzungsmedizin. Sie interessiert sich für die Ausbildung des »Mutterkuchens« bei einer normalen

Schwangerschaft des Menschen sowie für Ursachen von Funktionsstörungen.

» spektrum.de/artikel/1555476





Dieses Neugeborene ist ungewöhnlicherweise noch nicht abgenabelt. Meist geschieht das, sobald das Kind geboren ist und noch ehe der Mutterkuchen ausgestoßen wird.

AUF EINEN BLICK SCHICKSALHAFTE VERBINDUNG

- 1** Eine erfolgreiche Schwangerschaft hängt engstens von der korrekten Entwicklung und Funktionstüchtigkeit der Plazenta ab, dem ersten Organ des Kindes.
- 2** Das Immunsystem der Mutter muss die Plazenta tolerieren. Manche ihrer Immunzellen unterstützen sogar deren Einwachsen in den Uterus.
- 3** Schwangerschaftskomplikationen gehen oft auf Fehlbildungen des Mutterkuchens während der ersten Schwangerschaftsmonate zurück, wenn das Organ den engen Kontakt zur Mutter aufbaut.

► Bis zum Ausbruch der Zika-Epidemie 2015 in Brasilien galt eine Infektion mit diesem Virus als relativ harmlos. Vor allem hatten Mediziner nicht erwartet, dass der Erreger über die Mutter das ungeborene Kind erreicht. Er tut es aber, woran manche Föten sterben, während nicht wenige andere schwere Hirnschäden erleiden. Betroffene Babys kommen mit Mikrozephalie auf die Welt, einem zu kleinen Kopf. Wie das Zikavirus die Plazenta passiert, ist rätselhaft. Denn bei Dengue- und Gelbfieber, die ebenfalls von Mücken übertragen werden, schirmt das scheibenförmige Organ das Kind erfolgreich ab.

Und es gibt noch mehr Gründe, warum Forscher ihre Aufmerksamkeit zurzeit verstärkt auf das erste und größte Organ des Kindes richten. Zwar wird die Plazenta auch als Mutter- oder Fruchtkuchen bezeichnet, doch nicht etwa die Mutter bildet sie aus, sondern der Embryo. Zu den Aufgaben des Organs zählt, den Fötus mit Nährstoffen und Sauerstoff zu versorgen und Abfallprodukte zu entfernen. Trotz ihrer herausragenden Bedeutung für die Schwangerschaft ist die Plazenta sicherlich von unseren Organen dasjenige, das die Mediziner bisher am wenigsten verstehen. Beispielsweise wüssten wir gern mehr darüber, wieso das mütterliche Immunsystem Plazenta und Fötus nicht als (genetische) Fremdkörper attackiert, sondern sich ihnen gegenüber geradezu selbst in Schach hält – ja Entwicklung und Funktion des Mutterkuchens sogar unterstützt.

Ganz langsam enthüllen unsere eigenen Untersuchungen und Studien anderer Arbeitsgruppen, was da so alles vor sich geht. Beispielsweise wurden bestimmte Komplikationen in der Schwangerschaft bisher allein dem mütterlichen Organismus angelastet. Nun beginnen wir zu begreifen, dass sie vielmehr auf Fehlern der Plazenta oder auf einem mangelhaften Zusammenspiel mit der Gebärmutter, dem Uterus, beruhen. Möglicherweise kann es sogar im späteren Leben gesundheitliche Folgen haben, wenn mit dem Organ etwas nicht völlig in Ordnung war.

Ein Organ, das so ziemlich alles kann

Auch wenn wir viele Details rund um die Plazenta und ihre Einbettung in die Gebärmutterwand noch nicht vollständig verstehen, kennen wir zumindest ihre Struktur und die grundlegenden Schritte ihrer Entwicklung recht genau. Bei der Geburt wiegt der Mutterkuchen gut 500 Gramm, ungefähr ein Pfund, und ist in der Mitte wenige Zentimeter dick. Die beiden Seiten des tellerförmigen Gebildes sehen völlig verschieden aus. Die am Uterus haftende, maternale Seite erinnert an einen blutgetränkten Schwamm mit unregelmäßiger Oberfläche. Die andere, fötale Seite erscheint ziemlich glatt. Hier sind zahlreiche Blutgefäße deutlich sichtbar, die in die Nabelschnur münden (siehe Bild S. 43).

Die Plazenta entwickelt sich in der frühen Schwangerschaft sehr rasch. Schließlich muss sie, solange die anderen Organe des Kindes noch nicht oder unzureichend arbeiten, deren Funktionen wahrnehmen. Sie verstoffwechselt Nährstoffe wie später die Leber; an Stelle der Lungen leistet sie den Austausch von Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff; und sie entsorgt Abfallstoffe, später die Aufgabe der Nieren. Nicht einmal eine Woche nach der

Befruchtung zeigen sich auf der Oberfläche des Embryos spezialisierte Zellen, die zum Trophoblasten werden, dem »Nährblatt« des Keims. (Im Englischen bezeichnen Forscher diese Zellen selbst als »trophoblasts«.) Sie produzieren Hormone, die den mütterlichen Organismus auf den Embryo vorbereiten, und verankern diesen in der Uteruswand. Unter rasanten Zellteilungen entwickelt der Trophoblast dann Ausstülpungen, die sogleich in die Gebärmutter hineinwachsen. Wenig später lassen sich zwei Schichten unterscheiden, deren Zellen verschiedene Funktionen wahrnehmen: der Zytotrophoblast und der Synzytiotrophoblast (siehe großes Bild auf S. 40/41). Die Zellen des Synzytiotrophoblasten verschmelzen mit ihren äußeren Membranen und bilden die Oberfläche der Plazenta. Bald darauf hat der »Mutterkuchen« bereits Scheibenform und haftet mit seinen verzweigten Auswüchsen in der Wand der Gebärmutter.

In der zweiten und dritten Woche nach der Befruchtung füllen sich die Auswüchse mit Stützzellen und Blutgefäßen, wobei die so genannten Chorionzotten entstehen. Ungefähr zu dem Zeitpunkt, an dem Frauen ihre Schwangerschaft üblicherweise bemerken, sind die Chorionzotten bereits ausgereift (siehe Bild unten).

Diese fünf Wochen alte Plazenta stammt von einem Schwangerschaftsabbruch. Sie hat schon eine stark verästelte Oberfläche, ist aber noch nicht vom Blut der Mutter durchströmt und daher ziemlich blass. Normalerweise würde sie in dem Stadium den Embryo samt Fruchtblase komplett umschließen.

GETTY IMAGES / JUDY LEE



Voll funktionsfähig wird die Plazenta erst, wenn sie mütterliches Blut in sich hinein zu leiten vermag. Dafür sorgen die Zellen des Zytotrophoblasten. Sie heften sich zunächst an die Gebärmutterwand und dringen dann immer tiefer ein. Wie eine von uns (Fisher) schon vor Längerem entdeckte, verändern sich die Zellen dabei derart, dass sie blutgefäßauskleidenden Zellen ähneln. Dank dieses Tricks gelingt es ihnen, in Arterien der Mutter vorzudringen (siehe Grafik S. 40/41). Anschließend wandern sie an deren innerer Wand entlang und ersetzen dort die mütterlichen Zellen. Außerdem sorgen sie dafür, dass die Uterusarterien ihren normalen Tonus verlieren und sich aufweiten, so dass mehr sauerstoffreiches Blut ankommt.

Gegen Ende des ersten Schwangerschaftstrimesters öffnen sich die Arterien in die Zwischenräume der Chorionzotten. Von nun an liefern sie dem Fötus genügend frisches Blut mitsamt allem, was das Kind benötigt. In ähnlicher Weise tricksen die Zellen des Zytotrophoblasten die Venen der Gebärmutter aus und bringen sie dazu, Fötus und Plazenta von Kohlenstoffdioxid und Abfallstoffen zu entsorgen.

Mütterliches Blut, gespeist aus Arterien der Schwangeren, umspült nun die Oberfläche der Plazenta. Weil diese nur wenige Zellschichten von den Blutgefäßen des Fötus entfernt liegt, ist ein intensiver Stoffaustausch zwischen den beiden Gefäßsystemen möglich. Erst vor wenigen Jahren haben Wissenschaftler entdeckt, dass die Plazenta sogar große Mengen fötaler DNA ins Blut der Mutter abgibt (siehe auch **Spektrum** September 2008, S. 54). Das macht pränatale Gentests, die früher mit Risiken verbunden waren, viel einfacher.

Zwar steuern zum Großteil fötale Gene die Ausbildung der Plazenta, doch ist der Beitrag der unmittelbaren Umgebung dabei keinesfalls zu unterschätzen. Seit etwa zwei Jahrzehnten tritt zunehmend deutlich hervor, wie stark eine Schwangerschaft vom Austausch zwischen mütterlichen Zellen im Uterusgewebe und den dorthin vordringenden Plazentaverästelungen abhängt. Nicht nur gibt es einen regen Signalaustausch zwischen den Trophoblastenzellen und jenen der Gebärmutter, es wandern auch diverse Sorten von Leukozyten der Mutter zur Kontaktzone, also weiße Blut- oder Immunzellen.

Wie es dem mütterlichen Immunsystem gelingt, die Plazenta zu tolerieren, statt sie als körperfremdes Organ zu bekämpfen, ist noch lange nicht restlos geklärt. Neben einer allgemeinen immunologischen Umstellung der Mutter, die hier nicht näher beschrieben werden soll, spielen auch Vorgänge im Uterus selbst dabei eine Rolle. Ein solches Phänomen beschrieb einer von uns (Erlebacher) 2012 an Mäusen: Bestimmte Leukozyten, die normalerweise für die Abstoßung von transplantierten Organen verantwortlich sind, können sich im Uterus in der Nähe von Plazentaauswüchsen erst gar nicht anreichern.

Mehr noch: Das Immunsystem der Mutter fördert sogar aktiv das invasive Wachstum des fötalen Gewebes in den Uterus hinein. Das geschieht auf mehrere Weise. Unter anderem frappiert es die Forscher seit den 1980er Jahren, dass sich so genannte natürliche Killerzellen der Mutter auf deren Seite der Austauschzone ansammeln. Solche

Immunakteure vernichten normalerweise Tumoren und virusinfizierte Zellen. In diesem Fall unterstützen sie jedoch die Plazentabildung, sprich die Invasion in den Uterus. Dieses unerwartete Verhalten entdeckten in den 1990er Jahren Forscher um B. Anne Croy, die inzwischen an der Queen's University in Kingston (Ontario, Kanada) arbeitet. Die Killerzellen tragen nämlich dazu bei, dass Zytotrophoblastenzellen die Uterusarterien leichter umbauen können. Vermutlich erleichtern sie deren »feindliche Übernahme« durch Zellen fötaler Herkunft, indem sie Substanzen absondern, die den Verlust der ursprünglichen maternalen Zellen befördern.

Störungsanfälliger Ablauf: Ursachen für Frühgeburten und Präeklampsie

Gerade weil die Plazenta besonders schnell funktionstüchtig werden muss und sie – wie auch die Gebärmutterwand – viele verschiedene Zelltypen einbindet, wundert es nicht, dass im Kontaktbereich manchmal Fehler auftreten. Das kann die unterschiedlichsten Schwangerschaftskomplikationen zur Folge haben: in schweren Fällen beispielsweise eine Frühgeburt, also eine vor der 37. Schwangerschaftswoche; vermindertes Wachstum des Fötus; oder Präeklampsie, wobei die Mutter plötzlich sehr hohen Blutdruck bekommt und Gefäßschäden erleidet, was zu starken Krämpfen (Eklampsie) und zu Organversagen führen kann.

Erst jüngere Forschungen zur Plazenta halfen, einige der schweren Komplikationen besser zu verstehen. Eine Präeklampsie etwa tritt bei bis zu acht Prozent der Erstschwangerschaften auf. Unbehandelt kann sie für Mutter und Kind schädlich und sogar lebensbedrohlich werden. Früher stufen Mediziner die Präeklampsie als Schwangerschaftstoxikose ein, als Blutvergiftung der Mutter durch eine Stoffwechsellage. Sie glaubten, die Plazenta gebe Giftstoffe ins mütterliche Blut ab. Ganz genau kennen wir die Ursachen zwar immer noch nicht, aber die Komplikation scheint eher darauf zu beruhen, dass sich die Kontaktzone zwischen Plazenta und Gebärmutter ungenügend ausbildet – genauer, dass die Zellen des Zytotrophoblasten die Gebärmutterarterien in der ersten Hälfte der Schwangerschaft nicht hinreichend umbauen. Wegen der unzureichenden Blutzufuhr wächst das Kind in diesem Fall schlechter. Die schadhafte Plazenta gibt irgendwann tatsächlich toxische Substanzen ins Blut der Mutter ab, die diese nicht verträgt und die insbesondere ihren Kreislauf angreifen. Allerdings dürfte das erst eine Folge und nicht die eigentliche Ursache der Erkrankung sein, wie man früher annahm. Die Toxine sind wahrscheinlich nur eine Konsequenz der unzureichend ausgebildeten Plazenta.

Doch wieso der Mutterkuchen in dem Fall nur unzureichend funktioniert, wissen wir immer noch nicht genau. Machen die Zytotrophoblastenzellen etwas falsch, oder stimmt mit irgendwelchen Zellen der Mutter etwas nicht, oder kommt beides zusammen? Natürliche Killerzellen, die körperfremde Strukturen erkennen, könnten beteiligt sein. Die Immunologin und Expertin für Fortpflanzung Ashley Moffett von der University of Cambridge vermutet, falls die immunologischen Merkmale von Mutter und Plazenta

Kompliziertes Zusammenspiel

Der Erfolg einer Schwangerschaft hängt entscheidend von der Kontaktfläche zwischen Mutter und Kind ab, also dem Bereich, in dem Plazenta und Gebärmutterwand aufeinandertreffen. Etwa acht Wochen nach der Befruchtung spricht man vom Fötus. Ungefähr zehn bis zwölf Wochen nach der Befruchtung beginnt mütterliches Blut zur Plazenta zu fließen.

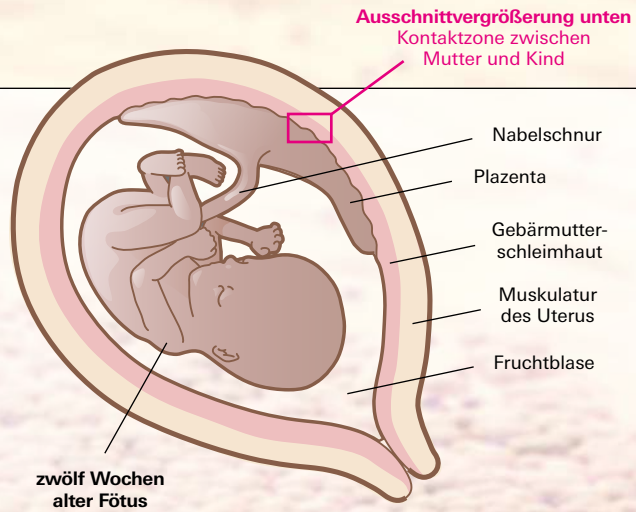


ILLUSTRATION: AXS BIOMEDICAL STUDIO; MIKROSKOPUFNAHME: SUSAN J. FISHER / SCIENTIFIC AMERICAN, OKTOBER 2017

innere Auskleidung der Gebärmutter

spiralförmige Arterie der Mutter in der Uteruswand

INVASION IN DIE GEBÄRMUTTER

1 Umbau der mütterlichen Arterien

Verzweigungen der Plazenta, die Chorionzotten (Foto rechts oben), wachsen in die Gebärmutterwand ein. Sie werden vom Trophoblasten, dem »Nährblatt« des Keims, gebildet, der zwei verschiedene Zellsorten hervorbringt. Die Zellen der einen Sorte verschmelzen und bringen ein Gebilde namens Synzytiotrophoblast hervor (grün). Die der anderen Sorte (Zytotrophoblast, lila) verschmelzen nicht; sie durchbrechen den Synzytiotrophoblasten, dringen in mütterliche Arterien ein und imitieren deren auskleidende Zellen.

2 Stoffaustausch

Die mütterlichen Arterien mit der neuen Innenauskleidung öffnen sich in die Zwischenräume zwischen den Chorionzotten. Deren Synzytiotrophoblast wird nun von mütterlichem Blut umspült, und es kommt zum Stoffaustausch zwischen Mutter und Fötus. Die Venen der Gebärmutter leiten sauerstoffarmes Blut weg.

sauerstoffreiches Blut der Mutter

Chorionzotten ragen in den Blutstrom.

Zytotrophoblast

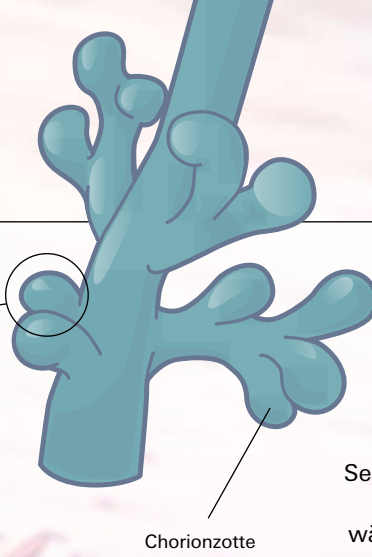
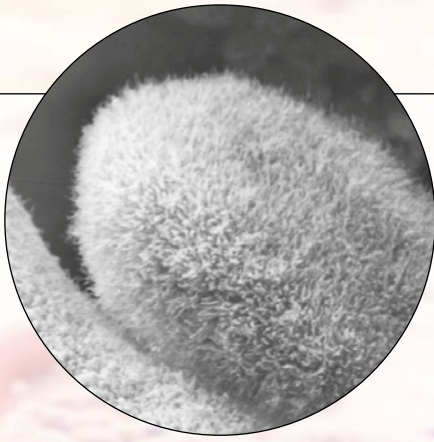
Synzytiotrophoblast

Austausch von Sauerstoff und Nährstoffen

Blut des Fötus

sich verankernde Chorionzotte mit invasiven Zellen des Zytotrophoblasten

Abtransport von Stoffwechselendprodukten und Hormonen



Große Oberfläche für maximalen Stoffaustausch

Anfangs wird der Fötus mit Sekreten der Gebärmutter-schleimhaut ernährt. Doch die Plazenta wächst sehr rasch und bildet viele Verästelungen sowie unzählige feinste Verzweigungen von nur einem zehntel Mikrometer Länge. Schließlich sind mütterliches und kindliches Blut lediglich durch eine äußerst dünne Schicht der Plazenta getrennt, über die ein sehr effektiver Stoffaustausch erfolgt.

3 Hilfe vom mütterlichen Immunsystem

Mütterliche Makrophagen und natürliche Killerzellen unterstützen das Einwachsen der Plazenta in die Uteruswand.

mütterliche Immunzellen

natürliche Killerzelle

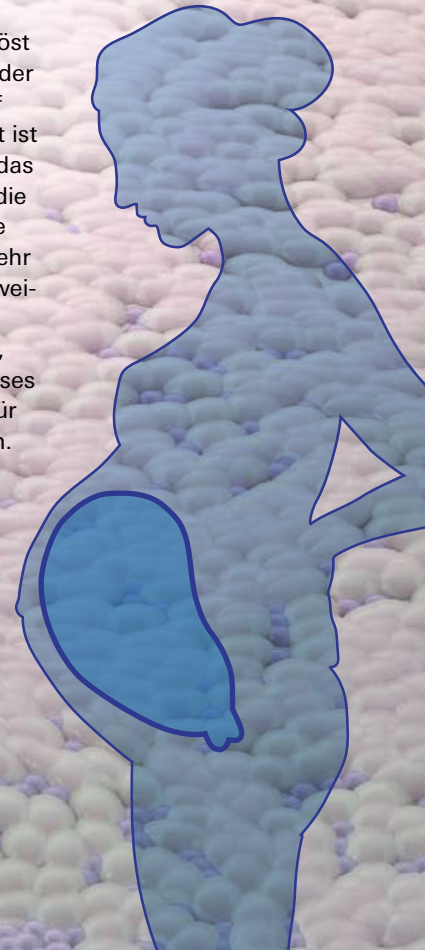
Makrophage

Vene des Uterus

sauerstoffarmes Blut

Offene Fragen

Viele Zusammenhänge sind noch ungeklärt. Woher etwa »weiß« die Gebärmutter, wann die Geburt stattfinden soll – ab wann also ihre Muskeln sich kräftig kontrahieren müssen, nachdem sie monatelang untätig waren? Und wie löst sich die Plazenta dann so schnell von der Uteruswand, mit der sie lange Zeit auf das Engste verbunden war? Rätselhaft ist auch, warum gefährliche Erreger wie das Zikavirus in manchen Fällen offenbar die Plazentabarriere passieren können, die normalerweise Keime und Giftstoffe sehr effektiv vom Kind fernhält. Möglicherweise beherbergt die Plazenta sogar ein spezifisches Mikrobiom aus Bakterien, Viren und selbst Pilzen. Störungen dieses Systems könnten mit verantwortlich für Schwangerschaftskomplikationen sein.



einander zu sehr ähneln, könnten die natürlichen Killerzellen vielleicht nicht ausreichend dabei helfen, in den Innenwänden der Uterusarterien die mütterlichen Zellen durch fötale zu ersetzen.

Frühgeburten nehmen in jüngster Zeit weltweit Besorgnis erregend zu. Fast jede zehnte Schwangerschaft ist inzwischen betroffen, auch in Deutschland und den USA. Ein Teil der Fälle hängt mit einer intrauterinen Infektion zusammen, doch oft finden die Ärzte keinen besonderen Grund. Allerdings versteht man auch noch immer nicht, was eigentlich zum richtigen Zeitpunkt eine normale Geburt auslöst. Vermutlich existiert eine Art innere Weckuhr, die die üblichen 280 Tage abzählt. Bekannt ist zumindest, dass der Alarm eine Entzündungskaskade im Uterus in Gang setzt. Diese dürfte die Gebärmutter unverzüglich veranlassen, sich zu kontrahieren und das Kind auszustoßen – nachdem die Muskulatur all die Monate untätig war. Aber tickt das Uhrwerk im Fötus, in der Plazenta oder im Uterus? Es ist zwar reine Spekulation, doch lässt sich leicht vorstellen, dass das Räderwerk hakt, wenn in der frühen Schwangerschaft etwas bei der Plazentabildung nicht korrekt ablief.



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter www.spektrum.de/t/schwangerschaft-und-geburt

Teilweise ähneln sich die Symptome und auch die zu Grunde liegenden Mechanismen der einzelnen Formen von schweren Schwangerschaftskomplikationen. Eine unzureichende Invasion fötaler Zellen in die Wände der mütterlichen Blutgefäße – wie bei der Präeklampsie – ist einerseits typisch, wenn das Ungeborene schlecht wächst, kommt aber andererseits auch manchmal bei einer Frühgeburt vor. Verstünden die Mediziner besser, wieso ähnliche Fehler an der Kontaktfläche zwischen Mutter und Kind derart unterschiedliche Syndrome hervorrufen können, ließen sich bessere Gegenmaßnahmen ergreifen.

Spätschäden wegen eingeschränkter Plazentafunktion

Natürlich schaden solche Störungen dem Kind. Manchmal vermag eine intensive medizinische Betreuung die schädlichen Auswirkungen einzudämmen, aber nicht immer. Dann können bleibende neurologische Beeinträchtigungen auftreten. Außerdem sind Spätfolgen möglich, die sich unter Umständen erst nach Jahrzehnten beim Erwachsenen zeigen.

Letzteres postulierte erstmals in den 1980er Jahren der britische Epidemiologe David Barker (1938–2013). Ihm war aufgefallen, dass Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Diabetes in armen Gegenden Englands besonders oft auftraten. Wie er dann feststellte, kann dergleichen mit einem

zu niedrigen Geburtsgewicht zusammenhängen, also womöglich mit unzureichender Ernährung im Mutterleib. Wie beides im Einzelnen zusammenspielt, wissen wir zwar noch nicht. Doch nach Ansicht einiger Forscher mögen Mangelernährung und eine unzureichende Plazentafunktion die genetische Entwicklungssteuerung des ungeborenen Kindes beeinträchtigen. Ebenso gibt es deutliche epidemiologische Hinweise, dass das Risiko für manche neurologischen Entwicklungsstörungen und psychiatrischen Erkrankungen steigt, wenn sich die Mutter in der Schwangerschaft bestimmte Infektionskrankheiten zuzieht, etwa eine Virusgrippe. Verdacht besteht unter anderem für Autismus, bipolare Störungen und Schizophrenie.

Zu Autismus im Zusammenhang mit einer Virusgrippe in der Schwangerschaft haben die Immunologen Dan R. Littman von der New York University und Jun R. Huh, jetzt an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts), zusammen mit ihren Teams 2016 eine Studie an Mäusen veröffentlicht. Schon vorher war bekannt gewesen, dass junge Mäuse autismusähnliche Verhaltensweisen zeigen, wenn die trüchtige Mutter Wirkstoffen ausgesetzt war, die im ganzen Körper Entzündungen hervorrufen, also quasi Viren imitieren. Als Agens, das die Entzündungen erzeugt, erkannten die Forscher das Protein Interleukin-17 (IL-17). Mütterliche Immunzellen geben es ab. Es ließ sich nachweisen, dass dieses Protein selbst winzige Strukturveränderungen in den Gehirnen der Mäusejungen hervorruft. Vielleicht erklären sich so bestimmte neurologische und psychiatrische Erkrankungen des Menschen, die erst in der Kindheit oder bei Erwachsenen auftreten.

Doch wie passiert das Protein die Plazentaschranke? Vielen anderen Molekülen ähnlicher Größe ist dieser Weg versperrt. Holt die Plazenta das Interleukin selbst aktiv ins fötale Blut? Oder können mütterliche Immunzellen, die den Wirkstoff herstellen, die Plazenta durchqueren? Beides wäre ziemlich beunruhigend.

Die Zika-Pandemie in Lateinamerika und den südlichen USA zeigt in dramatischer Weise, welche Folgen es für Kinder haben kann, wenn das Virus die Mutter infiziert und zum Fötus vordringt. Auf welche konkrete Weise allerdings der Erreger diese Schäden verursacht, ist im Detail nicht völlig geklärt. Auch darüber, wie er überhaupt zum Baby gelangt, wissen wir noch sehr wenig.

Überhaupt tauchte der Verdacht, dass das Zikavirus im Mutterleib Schädel- und Hirnfehlbildungen verursacht, erst 2015 auf, nachdem in Brasilien ungewöhnlich viele Neugeborene mit Mikrozephalie zur Welt gekommen waren. Es gibt auch noch keine genauen Zahlen dazu, wie hoch die Gefahr für infizierte Schwangere ist, ein derart missgebildetes Kind zu gebären. Anscheinend bestehen hier regionale Unterschiede. Einer Studie für die USA zufolge, die Anfang 2017 erschien, wiesen dort nur sechs Prozent der Föten und Neugeborenen von Frauen, die vermutlich eine Zikainfektion durchgemacht hatten, entsprechende Schädigungen auf. Nach einer anderen, Ende 2016 publizierten Erhebung für Brasilien betraf das dort jedoch – mehr oder weniger schwer – fast jede zweite solche Schwangerschaft. Sogar brasilianische Säuglinge, die zunächst noch als gesund gegolten hatten, entwickelten später neurologi-



Auf ihrer dem Kind zugewandten Seite wirkt die Plazenta ziemlich glatt, aber stark durchsetzt mit größeren Blutgefäßen, hier mitsamt der Nabelschnur unmittelbar nach der Geburt fotografiert.

sche Symptome. Einige Forscher fragen sich deshalb, ob in Brasilien möglicherweise ein Umweltgift der Plazenta zusetzt, so dass die Viren sie leichter passieren können. Oder in der Region sind noch andere Erreger verbreitet, mit denen sich die Mütter gleichzeitig infiziert hatten.

Kommen Zikaviren, die bis zum Fötus vordringen, überhaupt über die Plazenta? Und wenn ja, infizieren sie jeden Zelltyp auf ihrem Weg dorthin, oder verhelfen ihnen bestimmte Zellsorten zur erfolgreichen Passage, etwa mütterliche Immunzellen? Manche Krankheitserreger können durch die Vagina in die Gebärmutter aufsteigen und dort fötales Gewebe befallen. Ist das Virus einmal im Ungeborenen angekommen, auf welche Weise auch immer, bleibt es dort. In der Plazenta kann es nachweislich monatelang überdauern. Und im Gehirn des Kindes vermehrt es sich manchmal sogar noch nach der Geburt.

Bekanntlich können auch einige andere infektiöse Keime, die sich eine Schwangere eingefangen hat, die Plazenta passieren und dem Baby schaden, es sogar töten. Dazu zählt insbesondere das Rötelvirus. Weltweit werden Jahr für Jahr schätzungsweise 100 000 Kinder mit davon verursachten Fehlbildungen geboren – in gravierenden Fällen sind sie blind, taub, geistig behindert und haben Herzfehler sowie noch andere Beeinträchtigungen. Malaria, Herpes und Ebola sind ebenfalls hochgefährlich. Auch bei diesen Infektionen verstehen wir nicht genau, wie die Erreger zum ungeborenen Kind gelangen. Manches spricht dafür, dass gewisse Pathogene die Trophoblastenzellen der Plazenta recht leicht infizieren, und zwar

offenbar vor allem in der frühen Schwangerschaft. Dass die Immunabwehr der Mutter an der Kontaktzone zum Kind wahrscheinlich nicht immer besonders gut Wache hält, mag hinzukommen. Schließlich müssen hier zwei widersprüchliche Aufgaben vereinbart werden: Zum einen gilt es, Plazenta und Fötus vor Infektionen zu schützen; doch gleichzeitig darf die Immunphalanx nicht so stark auftreten, dass die Plazenta Schaden nimmt.

Wegen der vielen Wissenslücken hat das NICHD (Eunice Kennedy Shriver National Institute of Child Health and Human Development in Bethesda, Maryland) im Jahr 2014 das Human Placenta Project eingerichtet. Die daran beteiligten Forscher sollen zum einen die Bedeutung der Plazenta für die Schwangerschaft ergründen und deren Stellenwert für die Gesundheit von Mutter und Kind erfassen. Ein weiteres wichtiges Ziel des großen Projekts lautet, Langzeitfolgen von Störungen zu erkennen. Wir plädieren dafür, dem ersten Organ des Kindes ebenso viel wissenschaftliche und medizinische Aufmerksamkeit zu widmen wie den großen Volkskrankheiten Krebs, Adipositas, Herz-Kreislauf-Komplikationen oder auch solch verbreiteten Seuchen wie Aids. ◀

QUELLEN

- Brosens, I. et al.:** The »Great Obstetrical Syndromes« Are Associated with Disorders of Deep Placentation. In: *American Journal of Obstetrics and Gynecology* 204, S. 193–201, 2011
- Erlebacher, A.:** Immunology of the Maternal-Fetal Interface. In: *Annual Review of Immunology* 31, S. 387–411, 2013
- Maltepe, E., Fisher, S. J.:** Placenta: The Forgotten Organ. In: *Annual Review of Cell and Developmental Biology* 31, S. 523–552, 2015
- Moffett, A., Colucci, F.:** Uterine NK Cells: Active Regulators at the Maternal-Fetal Interface. In: *Journal of Clinical Investigation* 124, S. 1872–1879, 2014

ARTENVIELFALT ZU TODE BEGEHRT

Der Handel mit wilden Tieren trägt stärker zum Artensterben bei, als Experten bisher vermuteten. Die hohe Nachfrage nach exotischen Haustieren bedroht selbst Spezies mit intakten Lebensräumen.



Richard Conniff ist preisgekrönter Wissenschaftsjournalist und schreibt unter anderem für die »New York Times«.

» spektrum.de/artikel/1555478

► Eigentlich wollte David Wilcove in freier Wildbahn Vögel beobachten, als er sich 2012 auf der indonesischen Insel Sumatra aufhielt, doch dann fielen ihm in verschiedenen Dörfern die Käfige vor den Wohnhäusern auf. Darin saßen jene Tiere, die er in den Wäldern erwartet hatte. Jeder fünfte indonesische Haushalt, stellte er fest, hält Vögel als Haustiere. Der Naturschützer und Professor für Ökologie und evolutionäre Biologie an der Princeton University begann sich zu fragen, welche Folgen das für die Tierwelt hat.

Um dem nachzugehen, wich Wilcove von seiner geplanten Reiseroute ab und besuchte den Pramuka-Vogelmarkt in der Hauptstadt Jakarta – den größten Umschlagplatz für Vögel und andere Wildtiere in Südostasien. Man findet dort beinahe alles, von Fledermäusen bis hin zu Affen. »Es war wie ein riesiges Einkaufszentrum mit hunderten Käfigen, die wiederum hunderte Vögeln bevölkerten«, erinnert sich der Biologe. »Den meisten ging es gesundheitlich sehr schlecht. Sie sahen krank aus, ihre Federn waren zerzaust. Sie verhielten sich apathisch oder flatterten wild in ihren Käfigen herum, weil sie nicht in Gefangenschaft überleben können.«

Einige der Arten, die auf dem Markt verkauft werden, kann selbst gut ausgebildetes Zoopersonal nicht halten. Die Tiere sterben bald nach dem Kauf, »so wie eine Schnittblume schnell dahinwelkt«, bemerkt Wilcove. »Es war ein schockierender Anblick. Ich hatte so etwas noch nie gesehen.«





Auf dem Jatinegara-Tiermarkt in Jakarta verkaufen die Händler unzählige illegal gefangene Wildtiere, darunter Vögel und Echsen – aber auch Heuschrecken in Bambusrohren.

REDOX PICTURES / MARK LEONG



Wegen der hohen Nachfrage nach exotischen Haustieren in Europa und den Vereinigten Staaten exportieren Schmuggler jährlich Millionen wilder Tiere.

Wilcove und seine Kollegen registrierten einen Zusammenhang zwischen der Nachfrage von Vögeln auf dem indonesischen Haustiermarkt und deren Auftreten in der Wildnis. Damit können die Vogelpreise den Rückgang einer Art signalisieren, stellten die Forscher 2015 in einer Studie fest. Ein Beispiel dafür liefert die bei indonesischen Gesangswettbewerben gern eingesetzte Schamadrossel (*Copsychus malabaricus*): Zwischen 2013 und 2015 stieg ihr Marktpreis um zirka 1500 Prozent, während Naturschutzbiologen sie immer seltener in freier Wildbahn antrafen.

Berton Harris, Koautor der Studie und inzwischen bei der Organisation Rainforest Trust in Virginia tätig, konnte in Folgeuntersuchungen dann keine Spur der ehemals häufig vorkommenden Schamadrossel in Indonesien mehr entdecken. Selbst in anscheinend intakten Lebensräumen mit passenden Bedingungen – etwa in Wäldern, die mindestens fünf Kilometer von einer Straße entfernt liegen – fand er keine Vögel. Käufer zahlen für die gefährdeten Tiere

hohe Preise. Der Haustierhandel habe »das Potenzial, sie auszurotten, auch wenn ihre Lebensräume intakt sind«, sagt Wilcove, »und keiner bemerkt es«.

Das Problem betrifft allerdings nicht nur Vögel und auch nicht ausschließlich Indonesien oder andere Entwicklungsländer. Die hohe Nachfrage amerikanischer und europäischer Verbraucher befördert den Wildtierhandel ebenfalls. Tierhändler in den USA führen laut einer 2017 von Kristine Smith und ihren Kollegen geführten Studie jedes Jahr 225 Millionen lebende Tiere ein – in Deutschland etwa jährlich allein 850 000 Reptilien, berichtet das statistische Bundesamt. Die Liebe zu Haustieren ist offenbar nicht durchweg ein freundlicher Wesenszug des Menschen: Immer mehr Wissenschaftler vermuten, dass sie der Tierwelt schadet – in nahezu allen Lebensräumen weltweit.

Jahrelang machten Naturschützer die Zerstörung von Ökosystemen dafür verantwortlich, dass die Biodiversität abnimmt. Doch der boomende Wildtierhandel hat ebenfalls bedenkliche Folgen. Die weltweite Nachfrage nach exotischen Haustieren ist einer der stärksten Anreize dafür, Tiere in Gefangenschaft zu verschleppen. »Dass der Verlust von Lebensräumen das Überleben einer Art am stärksten bedroht, wird mittlerweile immer mehr in Frage gestellt«, sagt Crawford Allan vom Artenschutzprogramm Traffic, das 1976 gemeinsam vom WWF und der Weltnaturschutzunion IUCN gegründet wurde. »Es gibt Arten, die ausreichend Lebensraum besitzen und dennoch beunruhigend schnell aus der Natur verschwinden.«

Ökologen registrieren besorgt die hohe Nachfrage nach seltenen Arten. Viele bedrohte Tiere, die auf der roten Liste des IUCN stehen, sind durch den Wildtierhandel in Bedrängnis geraten. Dazu zählen Vögel wie der Balistar (*Leucopsar rothschildi*) und der Spix-Ara (*Cyanopsitta spixii*), Primaten wie der Sunda-Plumplori (*Nycticebus coucang*), Fische wie die Rotstreifenbarbe (*Sahyadria denisonii*) und Reptilien wie die Strahlenschildkröte (*Astrochelys radiata*) sowie die Schnabelbrustschildkröte (*Astrochelys yniphora*) aus Madagaskar. Doch dies sind lediglich einige bereits untersuchte Arten. Bei den meisten Wirbeltieren können Wissenschaftler noch

AUF EINEN BLICK LEBENDE WARE

- 1** Bislang hielten Biologen schrumpfende Lebensräume für die größte Bedrohung der Artenvielfalt. Doch mittlerweile trägt der Handel mit Wildtieren ebenfalls stark zum weltweiten Artenschwund bei.
- 2** In Europa und in den USA, aber auch darüber hinaus sind exotische Tiere sehr beliebt. Ihre manchmal sehr hohen Verkaufspreise machen sie zu Spekulationsobjekten und fördern die Kriminalität.
- 3** Die Tierzucht ist mitunter eine Alternative zum Fang in der Wildnis, aber nicht immer. Langfristig darf es mit dem Tierhandel nicht so weitergehen wie bisher.



Zahlreiche Tiere werden unter furchtbaren Bedingungen über die Grenzen hinweg transportiert. Viele von ihnen überleben diese Tortur nicht.

nicht einmal ansatzweise ermessen, inwieweit der Handel die wild lebenden Populationen beeinträchtigt.

Diesbezügliche Feldstudien sind zwangsläufig sehr langwierig; der Haustiermarkt kann sich dagegen äußerst rasch entwickeln. In den 1990er Jahren veröffentlichten Forscher die erste wissenschaftliche Beschreibung einer bestimmten Spezies der Schlangenhalschildkröten (Chelidae), die auf der Insel Roti im Süden Indonesiens lebt. Wie üblich publizierten sie auch Details zum Verbreitungsgebiet der Tiere. Tierfänger stürzten sich daraufhin auf die neu entdeckte Art – mit fatalen Folgen: Inzwischen ist sie vom Aussterben bedroht. Biologen lernten aus dieser schmerzlichen Erfahrung und hielten 2011 das genaue Verbreitungsgebiet einer Hornviper-Art in den Southern Highlands in Tansania geheim. Dennoch boten Händler die Schlangen im selben Jahr für mehr als 400 Euro pro Stück an.

Der lukrative Handel mit exotischen Tieren fördert kriminelle Energie

Sammler und Verkäufer von Wildtieren behaupteten häufig, im Sinne des Naturschutzes zu handeln, beklagt ein Ermittler auf dem Gebiet des Reptilienhandels, der anonym bleiben möchte: »Sie glauben, Arche-Noah-Populationen aufrechtzuerhalten. Oder sie sagen, der natürliche Lebensraum sei zerstört worden und sie würden diese Tiere schützen. In den meisten Fällen trifft das nicht zu.« Im Gegenteil, betont er, der Tierhandel dezimiere die natürlichen Populationen.

Ein Beispiel dafür liefert die vom Aussterben bedrohte Schnabelbrustschildkröte, die nur auf Madagaskar lebt. Ihre kommerzielle Ausbeutung ist seit 1975 durch die CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, deutsch: Übereinkommen über den internationalen Handel mit gefährdeten Arten freilebender Tiere und Pflanzen) verboten. Naturschützer arbeiteten jahrzehntelang dafür, die Population wieder zu vergrößern, und schätzten den wild lebenden Bestand im Jahr 2012 auf 600 bis 800 Tiere. Doch weil diese Reptilien so begehrt sind, fingen Wilderer sie immer häufiger ein, so

dass inzwischen etwa nur noch 100 erwachsene Tiere in freier Wildbahn leben. In Ländern wie Thailand, Indonesien und China, die sich nur selten nach CITES richten, trieben Spekulanten den Preis für eine große Schnabelbrustschildkröte auf über 80 000 Euro hoch.

Finanzspekulation schien auch das Motiv eines chinesischen Geschäftsmanns zu sein, der 2015 ungefähr 170 000 Euro für eine Chinesische Rothalschildkröte (*Chinemys nigricans*) ausgab. Die aus dem südlichen China stammende Art ist in der Wildnis inzwischen höchstwahrscheinlich ausgestorben. »Je bedrohter und seltener eine Spezies ist, desto eher eignen sich ihre Vertreter als Spekulationsobjekte«, sagt Rick Hudson, Amphibien- und Reptilienforscher und Präsident der Non-Profit-Organisation Turtle Survival Alliance in Texas.

Viele Händler, die Körperteile von wilden Tieren verkaufen – vom Rhinozeroshorn bis zur Krokodilhaut, etwa für Anwendungen in der »traditionellen Medizin« –, beteiligen sich auch am Haustierhandel. »In China sind die Preise und das Umsatzvolumen enorm gestiegen«, sagt Brian Horne, Herpetologe bei der amerikanischen Naturschutzstiftung Wildlife Conservation Society. Auch in Europa und den USA seien die Preise für exotische Haustiere in die Höhe geschossen. Dies befördert die Kriminalität: 2016 brachen Diebe in eine thailändische Zuchtstation ein und stahlen sechs Schnabelbrust- und 72 Strahlenschildkröten. Auch Sammler gerieten ins Visier von Kriminellen: In Hongkong drangen Einbrecher über ein Regenfallrohr in ein Haus ein und entwendeten trotz Überwachungskameras 23 gefährdete Schildkröten mit einem geschätzten Gesamtwert von 100 000 Euro.

Eine Gegenmaßnahme besteht darin, Menschen strafrechtlich zu verfolgen, die illegal gefangene Tiere halten oder verkaufen. 2016 verurteilte die amerikanische Justiz einen Mann aus Pennsylvania zu zwei Jahren Gefängnis, weil er mit einer bedrohten nordamerikanischen Schildkrötenart handeln wollte. Laut Ermittlungsbeamten sammelte John Tokosh 750 Waldbachschildkröten (*Glyptemys insculpta*) in einem Gebiet südlich von Pittsburgh. Um sie zu

transportieren, fixierte er sie mit Klebeband und verkaufte sie für fast 350 Euro pro Stück an Zwischenhändler, die sie nach Hongkong exportierten. Auch in Deutschland gab es bereits Haftstrafen wegen illegal gehaltener Tiere: Nach einer bundesweiten Razzia wurde eine Person, die einige Exemplare der vom Aussterben bedrohten Madagassischen Schnabelbrustschildkröte (*Astrochelys yniphora*) hielt, zu einer mehrjährigen Gefängnisstrafe verurteilt.

Doch solche Erfolge sind relativ selten. Das enorme Handelsvolumen überfordert die Zollbehörden: »Wir führen immer wieder unangekündigte Kontrollen durch, aber es bleibt eine Suche nach der Nadel im Heuhaufen«, sagt ein Inspekteur der US-Behörde Fish and Wildlife Service, der nicht autorisiert ist, mit der Presse zu sprechen, und darum anonym bleibt. »Wir haben mehr Ausrüstung und mehr Personal bekommen. Wir sind gut ausgebildet. Und doch sind wir immer im Nachteil. Bis wir einer heißen Spur nachgegangen sind, hat sich alles schon wieder verändert.« Einmal habe ein Händler sogar einen Orang-Utan ins Land geschmuggelt, indem er dem Tier die Haare schnitt, es braun färbte und unter eine Gruppe von Gibbons mischte (die legal gehandelt werden können).

Die unglaublich hohe Anzahl gehandelter Tierarten erschwert die Arbeit der Ermittler zusätzlich. »Keiner hier kennt all diese Vögel«, sagt Eric Goode, Gründer der Non-Profit-Organisation Turtle Conservancy in New York. »Das Gleiche gilt für tropische Fische: Nur die weltbesten Fischspezialisten könnten sämtliche Arten identifizieren. Es gibt zwar nur 340 Schildkrötenarten, doch unsere Inspektoren können eine Birma-Sternschildkröte nicht von einer Indischen Sternschildkröte oder verschiedene Weichschildkrötenspezies voneinander unterscheiden.« CITES erlaube es, jeglichen Handel mit einer vom Aussterben bedrohten Schildkröten- oder Papageienart zu verbieten, fügt Goode hinzu, aber Händler deklarierten ihre Tiere einfach als häufig auftretende Art, ohne dass es jemand merke.

Wenn Händler es mit dem Naturschutz ernst meinen, sollten sie aufhören, Wildfänge zu verkaufen und die Tiere stattdessen züchten, argumentiert Goode. »Wir müssen beispielsweise den Import von russischen Landschildkröten beenden.« Diese zentralasiatische Schildkrötenart werde in den Vereinigten Staaten und Europa häufig

verkauft. »Gehen Sie in eines der Handelslager und schauen Sie sich das entsetzliche Sterben dort an. Wozu berauben wir diese Wildtiere ihrer Freiheit?«

Züchten oder fangen?

In Gefangenschaft gezüchtete Tiere könnten den Handel wilder Vögel in Indonesien eindämmen, sagt David Wilcove. Tatsächlich halten inzwischen schon viele indonesische Haushalte gezüchtete Wellensittiche. Ein aktuelles Programm bietet Wellensittiche, Kanarienvögel und andere leicht zu haltende Arten in größeren Mengen preiswert an. Die Menschen sollen so davon überzeugt werden, dass sie keine Schamadrossel oder andere Wildfänge brauchen, die in einem Käfig nicht überleben können. »Es spricht nichts dagegen, auch Kanarienvögel an den beliebten indonesischen Gesangswettbewerben teilnehmen zu lassen«, so Wilcove.

Allerdings birgt die Tierzucht auch Probleme. Die New Yorker Non-Profit-Organisation EcoHealth Alliance informiert auf ihrer Website über die beste und schlechteste Wahl beim Kauf exotischer Haustiere. Dort heißt es, Zucht sei oft die bessere Wahl gegenüber dem Fang in der Wildnis. Wegen finanzieller Engpässe führt die Liste aber bisher nur 52 Arten auf – nicht einmal annähernd genug, um Tiersammler zufriedenzustellen. Viele beliebte Haustiere lassen sich nicht in Gefangenschaft züchten. Und falls doch, ist es häufig günstiger, ein aus der Wildnis entnommenes Tier zu kaufen. Als es Aquarianern endlich gelang, Mandarinfische (*Synchiropus splendidus*) zu züchten, »wollten die meisten Verbraucher keine 35 Euro für einen in Gefangenschaft gezüchteten Fisch bezahlen, wenn sie einen Wildfang für 10 Euro kaufen können«, klagt Scott Fellman, Verkäufer von Aquarienfischen, in einem Onlineforum. »Wir Hobbyaquarianer sollten uns schämen, dass wir [die Zucht] nicht intensiver unterstützen«, fügt er hinzu.

Viele selbst ernannte Züchter ergänzen deshalb ihre Bestände heimlich mit Wildfängen. Die Anzahl angeblich in Gefangenschaft gezüchteter und exportierter Papuahornvögel (*Rhyticeros plicatus*) etwa übersteigt »bei Weitem ihre Zuchtmöglichkeiten, da sich die Art nur sehr langsam fortpflanzt«, berichtete 2016 die Zoologin und Genetikerin Laura Tensen von der University of Johannesburg. Auch viele Frosch- und Chamäleonarten eigneten sich auf Grund ihrer geringen Fortpflanzungsrate nicht für Zuchtprogramme. »Dennoch werden sie zu Tausenden als angeblich in Gefangenschaft gezüchtete Haustiere verkauft«, ergänzt sie.

Die australischen Herpetologen Daniel Natusch und Jessica Lyons haben den Handel mit angeblich in Gefangenschaft gezüchteten Grünen Baumpythons (*Morelia viridis*) aus Indonesien gründlich untersucht. Sie fanden heraus, dass viele Zuchtstationen weder das Fachwissen noch die nötigen Anlagen für eine erfolgreiche Zucht der Reptilien besitzen. Die Wissenschaftler schätzen, dass 80 Prozent der exportierten Schlangen in Wirklichkeit Wildfänge sind.

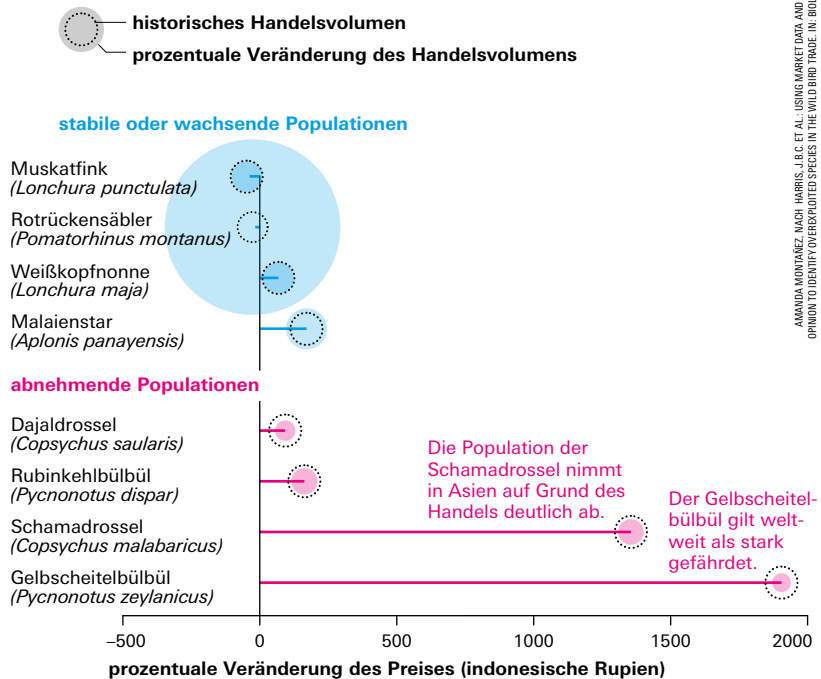
Doch selbst wenn man jede Tierart in Gefangenschaft züchten könnte, halten nicht alle Biologen das für sinnvoll. Natusch gibt zu bedenken, dass der Fang wilder Tiere manchmal ökologisch sogar besser sei als die Zucht: »Der



Diese gefährdeten madagassischen Schildkröten beschlagnahmte der malaysische Zoll.

Der Preis für Seltenheit

Die Nachfrage nach Vögeln auf den indonesischen Haustiermärkten zerstört die Populationen dieser Arten in der Wildnis, doch das Ausmaß der Bedrohung ist ungewiss. Die Überwachung wilder Bestände durch Feldstudien ist ausgesprochen teuer. David Wilcove und seine Kollegen von der Princeton University fanden heraus, dass der Marktpreis eines Tieres dessen Bedrohung anzeigen könnte. Steigende Preise und abnehmendes Handelsvolumen signalisieren den Schwund der Wildbestände.



AMANDA MONTANEZ, NACH HARRIS, J.B.C. ET AL.: USING MARKET DATA AND EXPERT OPINION TO IDENTIFY OVEREXPLOITED SPECIES IN THE WILD BIRD TRADE. IN: BIOLOGICAL CONSERVATION 187, S. 51-60, 2015 / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2017

Wildtierhandel macht natürliche Biotope zu Einkommensquellen, ohne die Biotope dafür zerstören zu müssen. Das gibt den Menschen einen Anreiz, Lebensräume zu schützen.« . Der illegale Handel mit Grünen Baumpythonen beispielsweise motiviert die Bewohner der Inselgruppe Raja Ampat dazu, ihre Wälder nicht abzuholzen. Allerdings räumt Natusch ein, dass manche Händler die Tiere entsetzlich behandeln, indem sie beispielsweise Schlangen in Koffer oder Wasserflaschen stopfen, um sie durch den Zoll zu schmuggeln. Und natürlich ist auch ihm klar, dass der Wildtierhandel etliche Arten bedroht.

Menschen, die seltene Arten halten, sind häufig davon überzeugt, dass sie den Tieren etwas Gutes tun – schließlich retteten sie sie aus der Wildnis und schützten sie vor Hunger, Fressfeinden und anderen natürlichen Bedrohungen, sagt der Zoologe Tom P. Moorhouse von der University of Oxford. Er ist Erstautor einer Studie über die innere Haltung von Verbrauchern gegenüber exotischen Haustieren von 2016. Die Käufer sähen es häufig als ihre Pflicht an, für ein Tier zu sorgen, sobald es auf dem Markt gehandelt werde. Das stimme natürlich nicht. »Wir müssen die Menschen mit einer Kampagne davon überzeugen, dass das falsch ist und dass ihre Entscheidungen massive Auswirkungen haben«, fügt Moorhouse hinzu. »Ohne Nachfrage nach exotischen Wildfängen gibt es auch keinen Markt dafür und keinen Grund, solche Tiere massenhaft der Natur zu entziehen.«

Die Haustierindustrie muss sich damit auseinandersetzen, was der Tierhandel in der Natur anrichtet. Nach wie vor sei der Naturschutz sehr wichtig, betont Mike Bober, Präsident des Pet Industry Joint Advisory Council. »Unserer Meinung nach gibt es Spielraum sowohl für Wildfänge als

auch für in Gefangenschaft gezüchtete Tiere – entscheidend sind die Methoden«, sagt er. »Wenn Tiere nachhaltig und von Indigenen gefangen werden, deren Einkommen von diesem Geschäft abhängt, kann das eine gute Sache sein. Nicht nachhaltig gefangene Tiere stellen jedoch ein Problem dar, auch für den Haustierhandel. Wir sind auf intakte Ökosysteme angewiesen. Ohne gesunde Haustiere gibt es auch keinen lukrativen Handel.«

Allerdings sind heute nur noch verschwindend wenige Ökosysteme in einem weitgehend ungestörten Zustand. Erschwerend kommt hinzu, dass es keine anerkannten Standards für das nachhaltige Fangen von Tieren gibt. Früher oder später werden Haustierhalter und Händler der Realität ins Gesicht sehen müssen: In einer Welt, in der sich Ozeane, Wälder und andere Habitate immer weiter leeren, darf es mit dem Haustierhandel nicht so weitergehen wie bisher. ◀

QUELLEN

Harris, J.B.C. et al.: Using Market Data and Expert Opinion to Identify Overexploited Species in the Wild Bird Trade. In: Biological Conservation 187, S. 51–60, 2015

Lyons, J.A. et al.: Wildlife Laundering through Breeding Farms: Illegal Harvest, Population Declines and a Means of Regulating the Trade of Green Pythons (*Morelia viridis*) from Indonesia. In: Biological Conservation 144, S. 3073–3081, 2011

Moorhouse, T.P. et al.: Information Could Reduce Consumer Demand for Exotic Pets. In: Conservation Letters 10, 3, S. 337–345, 2017

Tensen, L.: Under what Circumstances Can Wildlife Farming Benefit Species Conservation? In: Global Ecology and Conservation 6, S. 286–298, 2016



Heizdecke oder Kühlkissen? Wolken gibt es in unterschiedlichsten Formen und Grau-Weiß-Schattierungen. Manche lassen mehr Wärmestrahlung passieren, andere weniger.

KLIMAFORSCHUNG DAS WOLKENPARADOX

Die enorme Vielfalt an Wolken macht es schwierig vorherzusagen, wie sie auf eine weitere Erwärmung der Atmosphäre reagieren werden. Erst allmählich beginnen Forscher zu verstehen, ob Wolken den Klimawandel eher abbremsen oder beschleunigen.



Kate Marvel ist Klimaforscherin am Goddard Institute for Space Studies der NASA sowie am Department für angewandte Physik und Mathematik der New Yorker Columbia University.

► spektrum.de/artikel/1555480

► Unmengen an Daten deuten darauf hin, dass sich die Erde in diesem Jahrhundert und darüber hinaus deutlich erwärmen wird. Schwierig ist es jedoch bei der Frage, wie hoch der Temperaturanstieg genau ausfallen wird. Vielleicht ein Grad Celsius zusätzlich, zwei oder gar vier? Die Antwort hängt – neben der Entwicklung der weltweiten CO₂-Emissionen – vor allem von den Wolken ab. Der Klimawandel beeinflusst die Wolkenverteilung in der Atmosphäre, was die globale Erwärmung entweder abbremsen oder beschleunigen könnte. Vorhersagen zu können, welches Szenario eintritt, würde dabei helfen, wirksame Maßnahmen gegen das Aufheizen der Erde zu beschließen.

Wissenschaftler simulieren das Klima mit insgesamt über 20 ausgefeilten Computermodellen, deren Vorhersagekraft sie durch Abgleichen mit umfangreichen Wetterdaten testen. Alle Modelle zeigen, dass sich unser Planet auf Grund anhaltender Treibhausgasemissionen erwärmt. In puncto Wolken jedoch waren sich die Forscher lange uneins. Das scheint sich nun zu ändern: Simulationen, wie Wolken die Temperatur der Atmosphäre regulieren, nähern sich einander an. Auch Satellitendaten und andere Wetterbeobachtungen liefern neue Erkenntnisse über die klimatischen Einflüsse der Wolkendecke. Bieten sie Anlass zu Hoffnung, oder müssen wir eher Schlimmeres befürchten?

Bis zur industriellen Revolution hatte die Menschheit sechs Kontinente besiedelt und Wälder gerodet, um Weideland und Ackerflächen zu gewinnen oder Städte zu errichten. Dennoch lag die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre seit Jahrtausenden stabil bei zirka 280 Teilchen pro einer Million Luftteilchen (englisch: parts per million oder

ppm). Dann wird der Verbrennungsmotor erfunden. In den folgenden 150 Jahren steigt der CO₂-Gehalt in der Luft dramatisch an und heizt die Troposphäre auf. Inzwischen enthält die Atmosphäre mehr als 400 CO₂-Teilchen pro Million Luftbestandteile. Die Kontinente werden wärmer, ebenso die Ozeane. Zudem verändert sich die atmosphärische Zirkulation von Luftmassen und Wasserdampf. Hält der Trend an, wird sich die CO₂-Konzentration gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter bis Mitte des 21. Jahrhunderts verdoppelt haben. Die Temperatur auf der Erde wird dann noch viele hundert Jahre lang weiter ansteigen, bis schließlich ein neues Wärme Gleichgewicht erreicht ist.

Die Folgen einer Verdoppelung des CO₂-Gehalts für den Planeten nennt man Gleichgewichts-Klimaempfindlichkeit. Sämtliche Computermodelle sagen voraus, dass diese größer als null ist, sich die Erde global betrachtet also aufheizen wird. Wie stark, darüber gibt es keinen Konsens. Die Prognosen reichen von etwa 2 bis 4,5 Grad Celsius, von erheblich bis katastrophal.

Von Kumulus bis Zirrus – ein Cloud Atlas verrät den Temperatureffekt verschiedener Wolkentypen

Zu den Hauptstreitpunkten der Modelle gehören Wolken. Würde man ihre Entstehung und ihr Verhalten besser verstehen, könnten Forscher das Klima der Zukunft deutlich genauer vorhersagen. Die Rolle von Wolken zu bestimmen, ist aus zwei Gründen schwierig – weil verschiedene Typen unterschiedlich auf Erwärmung reagieren, und weil sich eine Veränderung der Wolkendecke auf den Strahlungshaushalt auswirkt.

Klimaforscher bezeichnen diesen wechselseitigen Einfluss als Rückkopplung. Einige klimatische Rückkopplungsmechanismen sind gut verstanden: Meereis zum Beispiel ist weiß und reflektiert Sonnenlicht nahezu vollständig (hohe Albedo). Wenn es schmilzt, bleibt dunkleres Wasser zurück, das deutlich mehr Strahlung absorbiert (geringe Albedo), sich also erwärmt. Die Folge: Mehr reflektierendes Meereis verschwindet, und eine immer größere dunkle Fläche ist der Sonne ausgesetzt, was die Erwärmung weiter beschleunigt. Wie sich diese positive Rückkopplung auf die Temperatur der Atmosphäre auswirkt, darüber sind sich die Modelle weitestgehend einig.

Schwieriger ist es, die Wechselwirkung zwischen Wolken und Klima zu bestimmen. Wissenschaftler haben eine Art Taxonomie der Wolken erstellt und sie geordnet, nach ihrer Höhe über der Erdoberfläche und ihrer Durchlässigkeit für einfallende Strahlung. Niedrige Wolken können recht transparent sein, wie Kumuluswolken (Hauftenwolken) an einem sonnigen Tag, oder eher opak, etwa als küstennahe Nebeldecke. Weiter oben in der Atmosphäre reicht das Spektrum ebenfalls von Zirruswolken (Federwolken), die Sonnenstrahlen fast völlig durchlassen, bis hin zu Gewitterwolken, die den Himmel verdunkeln.

Die Klassifizierung ist nützlich, weil sie verdeutlicht, wie Wolken die Erde erwärmen oder kühlen. Einige verstärken den Treibhauseffekt. Vor allem in der oberen Atmosphäre halten sie recht wirkungsvoll einen Teil der Strahlung zurück, die unser Planet aussendet. Andere bewirken das Gegenteil, indem sie verhindern, dass Sonnenlicht die

AUF EINEN BLICK ATMOSPHERE IM WANDEL

- 1 Wolken bestimmen in hohem Maß, wie stark die Erderwärmung ausfallen wird. Computersimulationen der atmosphärischen Prozesse sind jedoch schwierig.
- 2 Satellitendaten legen nahe, dass der Klimawandel hohe Wolken noch höher steigen lässt und die planetare Wolkendecke vom Äquator Richtung Pole verschiebt.
- 3 Diese Rückkopplungen werden den globalen Temperaturanstieg vermutlich beschleunigen, auch weil kühlende Wolkeneffekte offenbar weniger Linderung bieten als bislang angenommen.

Erdoberfläche überhaupt erst erreicht. Insbesondere dichte, niedrige Wolken reflektieren einen Großteil der einfallenden Strahlung. In der Summe überwiegt derzeit der abkühlende Effekt. Tatsächlich ist er netto etwa fünfmal größer als die Erwärmung bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration.

Folglich können bereits kleine Veränderungen in der planetaren Wolkendecke große Auswirkungen auf das globale Klima haben: Mehr hohe, transparente Wolken, die Sonnenlicht durchlassen, nicht aber die Rückstrahlung der Erde, würden den Planeten aufheizen. Ein verstärktes Auftreten niedriger, opaker Wolken hingegen würde uns vor der Sonne stärker abschirmen und für kälteres Klima sorgen. Darüber hinaus gilt es zu berücksichtigen, wohin sich die Wolken bewegen: Wenn reflektierende Wolken aus tropischen und subtropischen Breiten polwärtswandern, nimmt ihre Kühlwirkung ab. Wolken wiederum, die in kältere Bereiche der Atmosphäre aufsteigen, haben einen größeren Treibhauseffekt. Möglicherweise würden kalte Wolken in einer wärmeren Welt mehr Wassertröpfchen und weniger Eiskristalle enthalten, so dass sie dichter wären – und damit ein effektiverer Sunblocker für die Erde.

Da diese Phänomene nie isoliert auftreten, haben Klimamodelle Schwierigkeiten, den Einfluss von Wolken auf die globale Erwärmung zu ermitteln. Einige prognostizieren stark positive Rückkopplungen, die den Temperaturanstieg signifikant verstärken, und berechnen so eine Gleichgewichts-Klimaempfindlichkeit von bis zu 4,5 Grad. Andere sagen leicht negative Effekte voraus, die eine Erwärmung teilweise aufwiegen würden.

Ein weiterer Grund, warum Computer Wolken oft nicht adäquat simulieren können, sind die unterschiedlichen Größenskalen relevanter Prozesse. Einerseits entstehen Wolken aus kleinsten Wassertröpfchen und Eiskristallen, andererseits bedecken sie im Mittel etwa 70 Prozent der Erde. Sie sind winzig und riesig zugleich. Deshalb müssen sich Klimaforscher entscheiden, wenn sie ihre Modelle programmieren: Entweder sie konzentrieren sich auf die kleinskaligen Reaktionen der Wolkenbildung und -auflösung, oder sie beschreiben möglichst genau die großräumigen Bewegungen von Luftmassen rings um den Planeten. Es bräuchte zu viel Rechenpower, um alle Wassertropfen in der Atmosphäre über längere Zeiträume im Detail zu verfolgen.

Daher entwickeln Wissenschaftler vereinfachte Gleichungen, die auf den Gesetzen der Physik der Atmosphäre basieren und das Nettosystemverhalten berechnen. Hochauflösende regionale Simulationen dienen als Kontrolle und helfen, die Parameter globaler Klimamodelle zu optimieren. Dennoch ist es immer ein Kompromiss zwischen Mikro- und Makroebene.

Welche Modellkomponenten gilt es zu verbessern? Eine besondere Herausforderung stellen Wolken in großer Höhe dar. Messungen deuten darauf hin, dass sich die Zonen innerhalb der Atmosphäre durch den Klimawandel verschieben: Die Troposphäre, die unterste und für das Wetter relevante Schicht, expandiert, so dass die Tropopause – der Übergang zur Stratosphäre – nach oben wandert. Und mit ihr die Wolkengrenze.

NASA, SS7/APOLLO 17/CREW (AST7-14B-Z619)



An einem normalen Tag bedecken Wolken mehr als 70 Prozent der Erde und haben somit einen starken Einfluss auf das Klima des Planeten. Das Foto zeigt eine Wolkendecke über dem Pazifik.

Mark Zelinka vom Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien hat sich intensiv mit den Folgen dieses Aufstiegs beschäftigt. Wenn sich der Planet auf Grund von CO₂-Emissionen erwärmt, erklärt der Klimaforscher, gibt er auch mehr Energie in Form von Infrarotstrahlung ins All ab. Sollten Wolken ihre Höhe beibehalten, würden sie sich wie die Atmosphäre ebenso aufheizen und mehr Wärme nach außen verlieren. Er und andere Wissenschaftler glauben jedoch, dass Wolken eine bestimmte Temperatur bevorzugen und sich entsprechend in der Troposphäre positionieren. Das heißt, zusätzliche Wärmeenergie würde kaum ins All abgestrahlt, sondern größtenteils in der unteren Atmosphäre gespeichert. Eine klassische positive Rückkopplung – je höher die Wolken steigen, desto schlechter kann die Erde abkühlen.

Bei tief hängenden Wolken weisen die Modelle weitestgehend in die gleiche Richtung: In einer wärmeren Welt wird es weniger von ihnen geben. Laut Mark Webb vom britischen Wetterdienst Met Office in Exeter sind die Ursachen dafür unklar. Er und seine Kollegen nehmen an, dass trockene Luftmassen, die sich über wasserreichen Schichten bewegen, zum Rückgang niedriger Wolken führen könnten. Durch vertikale Konvektionsströme oder turbulente Verwirbelungen würden sie die feuchte Luft verdünnen und so Wolkenbildung verhindern. Aktuell könnten Modelle solche lokalen Prozesse jedoch auf Grund begrenzter Rechnerleistung nicht auflösen und nur indirekt abschät-

zen, erklärt Mark Webb. Aber der Trend scheint klar: Die Decke niedriger Wolken wird dünner, und mehr Sonnenlicht trifft auf die Erdoberfläche – was die Erwärmung verstärkt.

Darüber hinaus verändert sich die atmosphärische Zirkulation. Ihr Motor sind die unterschiedlichen Strahlungsintensitäten und Temperaturen zwischen Äquator und Arktis beziehungsweise Antarktis. Wenn warme tropische Luftmassen in Äquaturnähe aufsteigen, kühlen sie ab und können weniger Wasserdampf speichern: Es kommt zu kräftigen Regenfällen. In der Höhe strömt die Luft in Richtung der Pole und verliert zunehmend an Wärme. Um den 30. Breitengrad sinkt sie völlig dehydriert wieder ab, weshalb hier ein Wüstengürtel beide Hemisphären umspannt.

Der Klimawandel verschiebt diese Zonen. Der hohe Norden erwärmt sich schneller als die Tropen (Forscher sprechen von arktischer Verstärkung), so dass das Temperaturgefälle zwischen Äquator und Nordpol schrumpft. Eine Folge: Die regenreichen Tropen expandieren, und in Randgebieten wie der Mittelmeerregion oder dem Südwesten der USA wird es in Zukunft vermutlich noch trockener sein. Das Gleiche zeigt eine Auswertung von Satellitendaten. Sollten Wolken dieser Verschiebung folgen, würden sie entsprechend mehr Sonnenlicht in höheren Breiten reflektieren, wo die einfallende Strahlung schwächer ist als weiter südlich. Der Kühleffekt wäre reduziert.

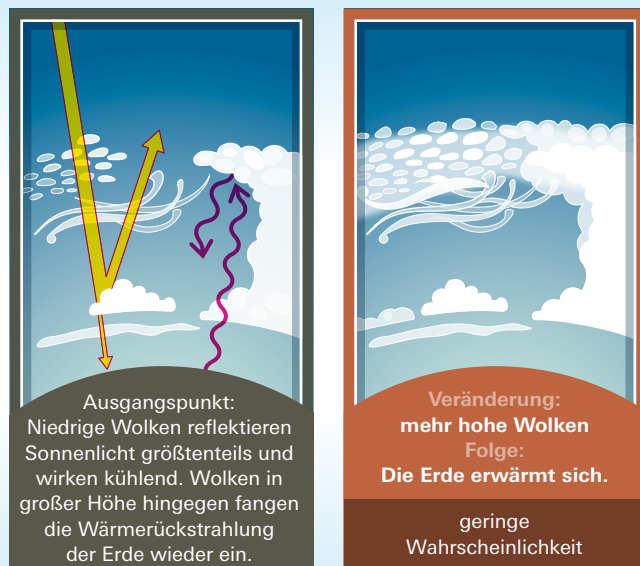
Es gibt auch eine wichtige negative Rückkopplung, die Modelle gegenwärtig nicht hinreichend berücksichtigen: Bei Erwärmung ändert sich in Wolken das Verhältnis von Eiskristallen zu Wassertröpfchen. Dicke, tief hängende Wolken enthalten mehr flüssiges Wasser und sind stärker opak als jene in großer Höhe. In einer wärmeren Welt könnte sich der Eisanteil hoher Wolken verringern, so dass ihr Reflexionsgrad (Albedo) zunehmen würde.

Es liegt in der Natur von Wolken, sich ständig zu verändern. Das macht es umso schwieriger, den globalen Temperaturanstieg genauer vorherzusagen. Hilfreich ist daher ein Blick zurück, auf den Wandel, der sich in den vergangenen Jahrzehnten bereits vollzogen hat. Seit den 1980er Jahren kreisen Wettersatelliten um die Erde, und fast ebenso lange vermessen Meteorologen die planetare Wolkendecke. In dem Klimaforscher Computermodelle mit den gewonnenen Daten abgleichen, können sie ihre Prognosen präzisieren.

Messungen aus den frühen Tagen der Erbeobachtung sind teilweise problematisch, etwa weil die Instrumente helle Objekte über schneebedeckten Regionen nicht identifizieren konnten oder Wolken nicht sahen, die sich unter

Wärmer oder kälter? Wie Wolken unser Klima beeinflussen

Im Zuge des Klimawandels könnte sich die Wolkendecke global verschieben und so den Planeten zusätzlich aufheizen oder abkühlen. Satellitendaten zeigen, dass sich die untere Atmosphäre schon heute verändert, so dass Wolken vermutlich mehr Wärmestrahlung auf der Erde zurückhalten. Dieser Trend könnte sich in Zukunft weiter verstärken.



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2017

höheren versteckten. Inzwischen aber erreichen uns aus dem Orbit detailgetreue Bilder globaler Klima- und Wetterphänomene, nicht zuletzt dank einer Satellitenformation der NASA namens Afternoon Constellation oder A-Train. Diese sechs Trabanten folgen wie die Wagons eines Zugs im Abstand weniger Minuten derselben Umlaufbahn und überfliegen den Äquator täglich am frühen Nachmittag. Einer der Satelliten, CloudSat, nutzt Radiowellen, die durch hohe, dünne Wolken dringen, um jene weiter unten in der Troposphäre zu messen. Er gibt zudem Auskunft, ob es regnet oder schneit. CALIPSO hingegen setzt auf Laserimpulse (Lidar), um Wassertröpfchen und Eiskristalle in Wolken zu bestimmen.

Auf der Suche nach Langzeittrends im Rauschen von kurzfristigen Wetterschwankungen

Der A-Train hat Wissenschaftlern zu einem deutlich besseren Verständnis atmosphärischer Prozesse verholfen: Die Satellitendaten scheinen beispielsweise die Vermutung zu bestätigen, dass hohe Wolken im Zuge der Erderwärmung weiter aufsteigen und zusätzliche Wärme zurückhalten. Zudem deutet eine jüngste Studie darauf hin, dass nicht alle hohen Wolken automatisch mehr Wasser und weniger Eis enthalten, wenn die Temperatur der Atmosphäre zunimmt. Das heißt, der Effekt einer negativen Rückkopplung durch größere Albedo wäre schwächer ausgeprägt als bislang angenommen.

CloudSat und CALIPSO ziehen erst seit 2006 ihre Bahnen im Orbit. Ihre Datenreihen sind also zu kurz, um langfristige klimatische Veränderungen von natürlichen Schwankungen des Klimas zu unterscheiden. Deshalb versuchen Forscher die Zeitserie durch Kombination mit älteren Beobachtungen in eine frühere Vergangenheit hinein zu verlängern. Zwar waren die Instrumente damals eher darauf ausgelegt, kurzfristige Wettertrends zu erkennen, und die verschiedenen Satelliten nahmen Messungen zu unterschiedlichen



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2017

Tageszeiten vor. Dennoch liefern die Daten wertvolle Hinweise – sofern man an den richtigen Stellen sucht.

Im Jahr 2015 versuchte ich zusammen mit Mark Zelinka die Fragen zu beantworten: An welchen Breitengraden ist der Himmel besonders wolkenverhangen, und wo ist er am klarsten? Wie erwartet fanden wir die stärkste Bewölkung in den Tropen. Auch in den mittleren Breiten, in der so genannten Westwindzone, gab es schmale Streifen mit einer hohen Wolkendichte. Strahlend blauer Himmel herrschte dagegen in den Subtropen. Hier sorgt atmosphärischer Hochdruck für trockene, sonnige Verhältnisse, die Wolkenbildung verhindern.

Anschließend wollten wir anhand von Satellitendaten, die zwischen 1984 und 2009 aufgezeichnet worden waren, herausfinden, ob sich die Lage stark bewölkter beziehungsweise wolkenfreier Zonen binnen 25 Jahren verschoben hatte. Und tatsächlich: In den mittleren Breiten wanderten die Wolken allmählich Richtung polare Zone, ebenso jenes klare Band der Subtropen. Wie in unseren Modellen expandierten die Tropen, das zeigten mehrere voneinander unabhängige Datensätze. Wir verglichen die Messwerte mit Klimasimulationen, die keine anthropogenen CO₂-Emissionen enthielten, und konnten so natürliche Schwankungen als Ursache der Wolkenverlagerung gen Nord- und Südpol ausschließen.

Die Konsequenzen daraus sind Besorgnis erregend. Wenn sich tiefe, stark reflektierende Wolkendecken zu sehr vom Äquator entfernen, büßen sie ihre Kühlwirkung größtenteils ein: An Stelle von intensiver tropischer Strahlung halten sie lediglich das schwache Sonnenlicht höherer Breiten von der Erde fern. Eine solche Migration der Wolken wäre eine starke positive Rückkopplung und würde nahelegen, dass das Klima empfindlicher auf den ansteigenden CO₂-Gehalt reagiert als bisher vermutet.

Joel Norris von der University of California, San Diego, konnte unsere Ergebnisse in einer späteren Studie bestäti-

gen. Neben dem Trend, dass Wolken näher an die Pole rücken, zeigten seine Daten, dass hohe Wolken weiter aufsteigen werden. Zwar sind sich Klimaforscher nicht darüber einig, wie bedeutsam diese Veränderungen sind und was ihre Triebkräfte sind – Treibhausgasemissionen, Vulkanausbrüche oder natürliche Schwankungen? Eines aber steht fest: Die verfügbaren Langzeitbeobachtungen liefern keinen Grund zur Annahme, dass Wolken den globalen Temperaturzuwachs abbremsen werden.

Stattdessen zeichnet sich ein anderes Bild ab. Das Aufsteigen von Wolken in der oberen Troposphäre und die Polwärtsverschiebung der Wolkendecke beschleunigen die Erderwärmung. Zugleich nimmt die Albedo weniger stark zu, wenn Eiskristalle zu Wassertröpfchen werden, sprich, die Entlastung durch verstärkte Reflexion der Sonnenstrahlung fällt geringer aus.

Was bedeuten diese Erkenntnisse nun für die Zukunft des Planeten? Wird sich der Temperaturanstieg eher am oberen Ende der prognostizierten Gleichgewichts-Klimaempfindlichkeit von 2 bis 4,5 Grad einpendeln? Noch ist die Verdopplung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre nur ein mögliches Szenario. Doch wenn wir unsere Emissionen nicht bald deutlich reduzieren, wird es in wenigen Jahrzehnten zur Realität. Und die Erde wird sich merklich aufheizen. Die Ausweitung von Satellitenbeobachtungen und verfeinerte Computermodelle werden Forschern helfen, den Grad der Erwärmung genauer einzugrenzen. Wolken, so scheint es jedenfalls, werden das Problem kaum abmildern, sondern bestenfalls nicht verstärken. ◀

QUELLEN

Marvel, K. et al.: External Influences on Modeled and Observed Cloud Trends. In: *Journal of Climate* 28, S. 4820–4840, 2015

Norris, J. R. et al.: Evidence for Climate Change in the Satellite Cloud Record. In: *Nature* 536, S. 72–75, 2016

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

GRAPHENPRODUKTION

IM HOBBYKELLER

Die Kohlenstoffvariante Graphen besitzt einzigartige Eigenschaften und gilt als Material der Zukunft. Die gerade mal atomdicken Folien herzustellen, ist gar nicht schwer.



Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

» spektrum.de/artikel/1555482

Kohlenstoff ist ein so genanntes polymorphes Element, das in verschiedenen Zustandsformen, oder Modifikationen, auftreten kann: Bei identischer chemischer Zusammensetzung können die Atome von Feststoffen räumlich unterschiedlich angeordnet sein und so Materialien mit gänzlich anderen Eigenschaften hervorbringen. Im Diamant etwa, dem härtesten natürlich vorkommenden Stoff, bilden die Kohlenstoffatome ein kubisches (würfelförmiges) Kristallgitter. Weiches Graphit hingegen besteht aus regelmäßigen Kohlenstoffsechsecken in nur locker miteinander verbundenen, wabenartigen Schichten. Neben diesen beiden prominenten Vertretern der Kohlenstofffamilie gibt es weitere, exotischere Modifikationen: Fünf- und Sechsecke aus Kohlenstoff können sich zu winzigen Röhrchen (Nanotubes) oder käfigartigen Strukturen arrangieren, die Miniaturfußbällen gleichen (Fullerene). Zudem ist den letzten Jahren eine zweidimensionale Variante des Graphits in den Fokus der Wissenschaft gerückt: Graphen, ein Kohlenstoffatom dicke Folien mit Wabenmuster.

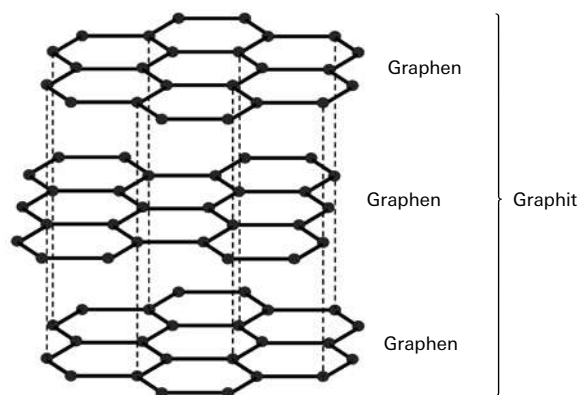
Graphen ist härter als Stahl, gleichzeitig jedoch leichter und belastbarer. Zudem übertrifft seine Leitfähigkeit die von Kupfer. Auf Grund dieser einzigartigen Eigenschaften wurde Graphen bereits als »Wundermaterial des 21. Jahrhunderts« betitelt. Die Europäische Union fördert zurzeit ein so genanntes Flaggschiff-Projekt zur Erforschung möglicher Anwendungen von Graphen mit einer Milliarde Euro. Es könnte etwa als Elektrodenmaterial in Superkondensatoren und Akkumulatoren zum Einsatz kommen und so die Energiewende erleichtern. Auf Graphen basierende Superkondensatoren können – zumindest theoretisch – die doppelte Energiedichte der aktuell leistungsfähigsten Batterien erreichen und wären deutlich schneller wieder aufgeladen. Ob der »Wunderwerkstoff« die großen Hoff-

nungen von Forschung und Politik tatsächlich erfüllen wird, bleibt abzuwarten.

Wissenschaftler gewinnen Graphen überwiegend aus Graphit. Zur Herstellung der ultradünnen Folien müssen sie die so genannten Van-der-Waals-Kräfte überwinden. Das sind relativ schwache Wechselwirkungen, die zwischen benachbarten Kohlenstoffschichten auftreten. Einzelne Graphenlagen lassen sich recht unkompliziert mit Hilfe eines Klebestreifens vom dreidimensionalen Graphitgitter ablösen. Für diese Entdeckung und die erste Charakterisierung von Graphen erhielten die Forscher Andre Geim und Konstantin Novoselov 2010 den Physiknobelpreis.

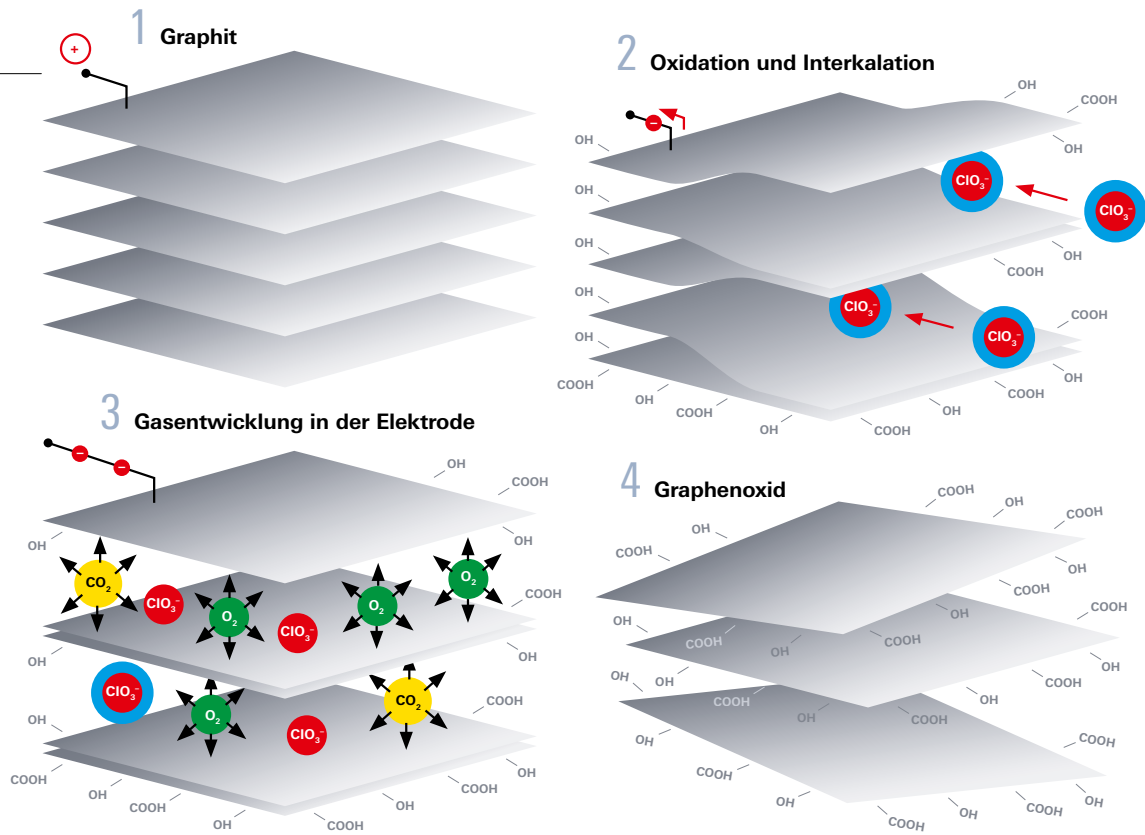
Die simple »Tesafilmtechnik« eignet sich für Experimente im Labormaßstab, nicht aber für kommerzielle Zwecke.

Im Graphen sind die Kohlenstoffatome in einem Muster aus regelmäßigen Sechsecken angeordnet. Übereinandergestapelt bilden die wabenartigen Schichten Graphit.

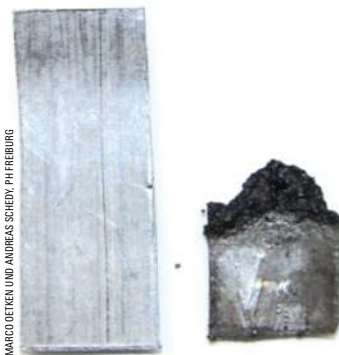


Synthese von Graphenoxid

Bei der Elektrolyse fließen Elektronen von der Graphitanode zur Kathode (1). Zum Ladungsausgleich drängen Chlorationen (ClO_3^-), umgeben von Wassermolekülen, in das Graphitgitter und weiten es (2). Die angelegte Spannung oxidiert den Kohlenstoff zum Teil. In der Anode bilden sich zudem Gase, die das Gitter weiter aufdrücken (3). Schließlich zerfällt die Anode in einzelne Schichten aus Graphenoxid (4).



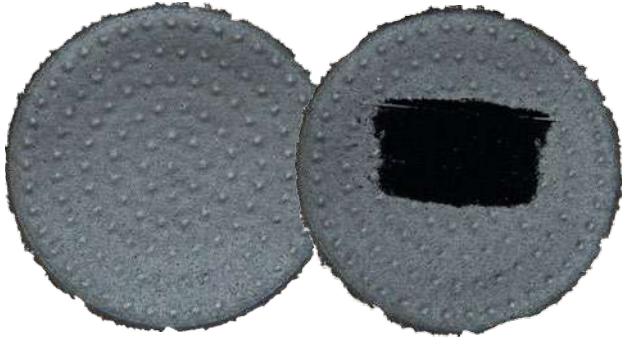
Neben einem Klebestreifen eignet sich auch Elektrolyse zur Herstellung von Graphen. Ausgangsmaterial ist eine Graphitanode. Im Lauf der Elektrolyse zerfällt diese (rechts) zu feinen Partikeln aus Graphenoxid (oben). Durch eine fotochemische Reduktion erzeugt man daraus schließlich Graphen.



Größere Mengen Graphen kann man auf zwei Arten gewinnen: Beide Verfahren – benannt nach den Chemikern Benjamin Collins Brodie und William S. Hummers – führen zunächst zur Bildung von Graphenoxid (GO), das in der Folge zu Graphen reduziert wird. Bei der Hummer-Methode kocht man das Graphit erst in einer Mischung aus Natriumnitrat, dem Oxidationsmittel Kaliumpermanganat (KMnO_4) und konzentrierter Schwefelsäure. Das entstandene Graphitoxid wird anschließend mittels UV-Licht oder Ultraschall zu Graphenoxid aufgetrennt. Bei dem Verfahren entsteht als Nebenprodukt Dimanganheptoxid (Mn_2O_7), das oberhalb von 55 Grad Celsius sowie bei Kontakt mit organischen Verbindungen zu stark explosiven Reaktionen neigt. Alternativ dazu setzt die Brodie-Methode bei der Herstellung von Graphen auf Salpetersäure und Chlorationen (ClO_3^-), die ebenfalls stark oxidierend wirken. Das Verfahren ist allerdings recht aufwändig. Zudem bilden sich Stickoxide und Chlordioxid, so dass auch bei diesem Syntheseweg gefährliche Nebenreaktionen auftreten können.

Hier möchten wir eine dritte und völlig sichere Variante vorstellen. Mit Hilfe einer Salzlösung, einer Spannungsquelle sowie einem Blitzgerät können Sie Graphen im Handumdrehen auf verblüffend einfache Weise selbst herstellen. Zuerst scheiden wir an einer Graphitelektrode elektrochemisch Graphenoxid ab, das wir dann fotochemisch zu Graphen reduzieren.

Die Synthese gelingt wie folgt: Wir schalten eine Graphitfolie als Anode (Pluspol) und eine Kupferfolie als Kathode (Minuspole) und elektrolysieren 20 Minuten lang



MARCO OETIKEN UND ANDREAS SCHEIDY, PH FREIBURG

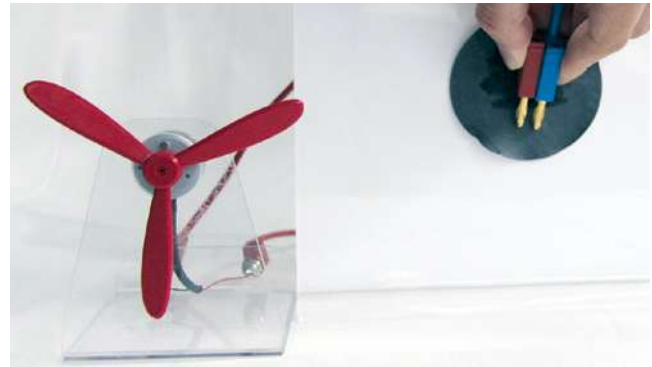
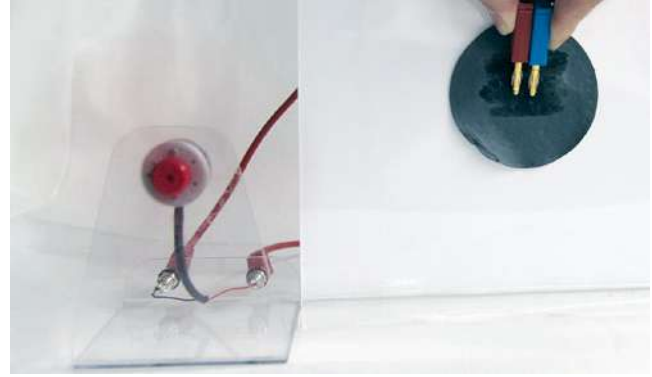
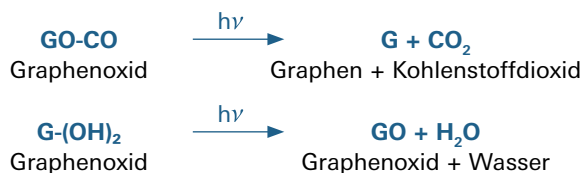
Ein starker Kamerablitz reduziert graues Graphenoxid zu schwarzem Graphen (oben). Während Graphen elektrischen Strom leitet, ist die oxidierte Form ein Isolator (rechts).

bei einer Spannung von 15 Volt. Die beiden Elektroden sind dabei in einen wässrigen Elektrolyten aus Kaliumchlorat (KClO_3) getaucht. In mehreren Schritten entsteht nun Graphenoxid. Während der Elektrolyse fließen Elektronen von der Graphitanode zur Kupferkathode. Um den Elektronenmangel am Pluspol auszugleichen, lagern sich Chloratanionen in die Graphitmatrix ein. Chemiker sprechen hierbei von Interkalation. Die negativ geladenen Teilchen sind von einer Hydrathülle aus Wassermolekülen umgeben, die sich ebenfalls in das Anodenmaterial zwängen. Die Ionen samt ihrer Wasserhülle sind um ein Vielfaches größer als die Elektronen, die sie ersetzen, so dass sich das Graphitgitter bei der Einlagerung mechanisch weitet. Gleichzeitig sorgt die angelegte Spannung für eine teilweise Oxidation des Kohlenstoffs im Graphit. So bilden sich etwa sauerstoffhaltige Hydroxy- (-OH) oder Carboxygruppen (-COOH).

Im nächsten Schritt zerfällt die Hydrathülle der Chloratanionen, und an der Graphitelektrode entstehen gasförmiger Sauerstoff (O_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2). Auf Grund der Gasentwicklung nimmt der Druck im Graphit stark zu. Die Anode dehnt sich weiter aus und bricht schließlich auseinander: in dünne Schichten aus Graphenoxid.

Die so erhaltenen Partikel zerkleinern wir in einem Mixer zu einer gleichmäßigen Graphenoxid-Suspension. Anschließend fangen wir das Graphenoxid auf einem Papierfilter auf, spülen diesen mit deionisiertem (destilliertem) Wasser, um das Elektrolytsalz restlos zu entfernen, und trocknen ihn zusammen mit dem Graphenoxid darauf. Den finalen Schritt, die Reduktion zu Graphen, erledigt ein externes Blitzgerät, das wir auf das Filterpapier aufsetzen. Dort, wo das Blitzlicht auf das Graphenoxid trifft, wechselt die Farbe von Grau hin zu einem tiefen Schwarz.

Der genaue Mechanismus der Graphenoxid-Reduktion ist recht kompliziert. Vereinfacht lassen sich die beteiligten fotochemischen Reaktionen wie folgt zusammenfassen (« $h\nu$ » steht für Lichtenergie):



MARCO OETIKEN UND ANDREAS SCHEIDY, PH FREIBURG

Ob die fotochemische Reduktion erfolgreich war, können wir anhand einer Leitfähigkeitsmessung überprüfen. Denn während Graphen elektrischen Strom leitet, ist es in oxidierter Form ein guter Isolator. Ein Kohlenstoffatom hat vier freie Valenzelektronen, die eine Molekülbindung eingehen können. Im Graphen hat es jedoch nur drei Bindungspartner, so dass es mit einem seiner Nachbarn eine Doppelbindung eingeht. Innerhalb jeder Graphenwabe gibt es zwei davon. Die beteiligten Elektronen haben keinen festen Platz – man bezeichnet sie als delokalisiert – und agieren daher als freie Ladungsträger. Die Hydroxy- und Carboxygruppen im Graphenoxid heben diese Eigenschaft auf, da Sauerstoffatome eine starke Anziehungskraft auf Elektronen ausüben und sie in ihrer Bewegung einschränken.

Zur Kontrolle der elektrischen Leitfähigkeit schließen wir einen kleinen Motor mit Propeller an eine Spannungsquelle an und überbrücken den Stromkreis zunächst über den äußeren, grauen Rand des Filters: Nichts passiert. Erst wenn wir den Stromkreis über den schwarzen Bereich schließen, dreht sich der Propeller. Hier liegt also tatsächlich Graphen vor. ◀

Eine ausführlichere Versuchsbeschreibung, Bezugsquellen und Anleitungen für weitere Experimente rund um Graphen finden Sie in der Online-Ergänzung unter www.spektrum.de/artikel/1555482.

QUELLEN

Münchgesang, W. et al.: Supercapacitors Specialities. In: Technology Review. American Institute of Physics Conference Proceedings 1597, S. 196–203, 2014

Parvez, K. et al.: Exfoliation of Graphene via Wet Chemical Routes. In: Synthetic Metals 210, S. 123–132, 2015

Steurer, P.: Funktionalisierte Graphene aus Graphitoxid für Katalyse, Beschichtungen und thermoplastische Nanocomposites. Dissertation, Universität Freiburg, S. 23–25, 2010



FREISTETTERS FORMELWELT DIE KLEINSTE SIERPIŃSKI-ZAHL

Taucht man tief genug in die Mathematik ein, erweisen sich selbst kleine Zahlen als überraschend harte Nuss.

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

► spektrum.de/artikel/1555484

Wer die größte Zahl mit einer gewissen Eigenschaft sucht, wird schnell ein Problem erkennen: Im Zweifelsfall gibt es unendlich viele, die man nicht einfach alle durchprobieren kann. Viel leichter erscheint es, den kleinsten Wert mit einem bestimmten Merkmal aufzuspüren. Beschränkt man sich auf die natürlichen Zahlen, dann ist bei der 1 unweigerlich Schluss. Noch kleinere Werte können nicht mehr auftauchen, und die Anzahl der Möglichkeiten ist endlich.

So einfach, wie es scheint, ist es allerdings nicht immer. Betrachten wir dazu zum Beispiel diese Menge:

$$\{k \cdot 2^n + 1 : n \in \mathbb{N}\}$$

Man wählt eine beliebige, aber ungerade natürliche Zahl k , geht dann der Reihe nach alle natürlichen Zahlen n durch und berechnet jeweils den Ausdruck $k \cdot 2^n + 1$. Man erhält auf diese Weise eine unendliche Menge an Zahlen, und wenn darin nirgendwo eine Primzahl auftaucht, dann wird k eine »Sierpiński-Zahl« genannt (nach dem polnischen Mathematiker Wacław Sierpiński).

Eine seit 1967 unbeantwortete Frage lautet: »Ist 78557 die kleinste Sierpiński-Zahl?« Es erscheint seltsam, dass es seit mehr als fünf Jahrzehnten darauf keine Antwort gibt – immerhin bleiben ja nur 39278 ungerade natürliche Zahlen übrig, die man prüfen muss. Ist keine davon eine Sierpiński-Zahl, dann lautet die Antwort »Ja«. Doch darf man nicht vergessen: Für jede dieser Zahlen muss eine unendlich lange Zahlenfolge daraufhin untersucht werden, ob Primzahlen darin enthalten sind oder nicht.

Angesichts dessen mutet es wiederum unmöglich an, dass man überhaupt irgendeine Sierpiński-Zahl identifizieren kann. Tatsächlich gelang es jedoch bis zum Jahr 2002, die Anzahl der möglichen Sierpiński-Zahlen, die kleiner als 78557 sind, auf 17 Stück einzugrenzen. Um auch die noch zu prüfen, wurde das Projekt »Seventeen or Bust« gestartet. Jeder Mensch

mit einem Computer und einem Internetanschluss konnte sich an dem gemeinschaftlichen Rechenvorhaben beteiligen. Bei 12 der 17 Zahlen konnte nachgewiesen werden, dass irgendwo in der Reihe eine Primzahl auftaucht, bevor ein Serverausfall im Jahr 2016 das Projekt stoppte.

Übrig blieben die Zahlen 21181, 22699, 24737, 55459 und 67607. Ihnen widmet sich nun das Projekt »PrimeGrid«, das die Frage durch verteiltes Rechnen auf vielen Computern endgültig beantworten soll. Es ist allerdings nicht sicher, ob es diese Antwort auch geben wird. Die einzige Methode, die dafür zur Verfügung steht, besteht in der Anwendung des »Satzes von Proth«: François Proth war hauptberuflich Landwirt, gleichzeitig aber auch ein engagierter Amateurmathematiker, der in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts eine Methode erfand, wie man bei bestimmten Zahlen vergleichsweise schnell und einfach testen kann, ob es sich um Primzahlen handelt. Die bei der Prüfung einer potenziellen Sierpiński-Zahl auftauchenden Zahlen gehören glücklicherweise dazu und machen eine Behandlung des Problems am Computer möglich.

Wenn die fünf restlichen Werte wirklich keine Sierpiński-Zahlen sind, wird der Computer das früher oder später feststellen. Sollte die Antwort auf das Sierpiński-Problem jedoch »Nein« lauten, also eine der fünf verbleibenden Zahlen das oben genannte Kriterium erfüllen, käme die Computerprüfung nie zu einem Ende. Denn wenn nirgendwo in der von der potenziellen Sierpiński-Zahl erzeugten Reihe eine Primzahl auftaucht, wird das Computerprogramm ewig weiter-suchen.

Aber es ist auch irgendwie tröstlich, dass es solche schwer zu beantwortenden Fragen gibt. Vielleicht wird es am Ende doch noch die kreative Idee eines Menschen sein, die dieses Problem löst, und nicht die brutale Rechenkraft eines Prozessors.

ASTRONOMIE EIN HIMMEL VOLLER EXOPLANETEN

Mit dem Weltraumteleskop Kepler gelang die Entdeckung tausender Planeten um andere Sterne. Inzwischen hat es ausgedient, aber zwei neue Missionen werden seine Nachfolge antreten.



Joshua N. Winn untersucht an der US-amerikanischen Princeton University die Bildung und Entwicklung von Exoplaneten. Der Astrophysiker war an der Kepler-Mission beteiligt und gehört zum Team des Weltraumteleskops TESS.

» spektrum.de/artikel/1555486

Astronomen wollen bald mehr darüber erfahren, wie Planeten um andere Sterne beschaffen sind und welche Prozesse sich in ihren Atmosphären abspielen – hier eine Illustration.

AUF EINEN BLICK BEREIT FÜR NEUE FUNDE

- 1** Nach dem Ende der ertragreichen NASA-Mission Kepler sollen spezialisierte Weltraumteleskope am ganzen Himmel nach weiteren Exoplaneten suchen.
- 2** Der Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) und der Characterising Exoplanet Satellite (CHEOPS) registrieren Änderungen der Leuchtkraft von Sternen, verursacht von Planeten in deren Umlaufbahnen.
- 3** Die Missionen werden uns der Antwort auf die Frage näherbringen, ob es außer der Erde noch mehr lebensfreundliche oder sogar belebte Welten gibt.

Am 21. August 2017 habe ich gemeinsam mit meiner Familie und zeitgleich mit Millionen anderen die totale Sonnenfinsternis verfolgt, die an diesem Tag entlang eines schmalen Landstreifens quer durch die USA zu beobachten war. Das unheimliche Zwielficht und der Anblick einer gleißenden Korona über der geschwärzten Sonne haben vielleicht sogar einige junge Menschen zu einer Karriere in der Astronomie inspiriert. Schließlich regen Finsternisse den Forscherdrang der Menschen seit Jahrhunderten an. Auch meine eigene Arbeit hat mit Verdunklungen von Sternen zu tun, allerdings solchen eines ganz anderen Typs: Ich erforsche den »Transit« von Exoplaneten. Dabei handelt es sich um eine kurzzeitige und selbst mit Teleskopen nur andeutungsweise wahrnehmbare Abschwächung des Lichts eines Sterns, vor dem gerade ein Planet vorbeizieht.

Die erste Erscheinung dieser Art haben Astronomen 1999 aufgezeichnet. Eine Dekade später lag die Zahl der aufgespürten Transits schon bei mehr als 100. Inzwischen sind wir bei mehr als 3500 bekannten Exoplaneten gelangt. Das liegt vor allem an der Kepler-Mission der US-Raumfahrtbehörde NASA, die jedoch kurz vor ihrem Ende steht. Und obwohl die Transitmethode aktuell die ertragreichste Art ist, neue Welten ausfindig zu machen, haben Astronomen auch mit anderen Strategien mehr als 700

Exoplaneten entdeckt. Die Vielfalt der Himmelskörper übersteigt alles, was die Modelle der Planetenentstehung vorhergesagt haben – und wir kratzen vermutlich gerade einmal an der Oberfläche dessen, was da draußen noch einer Entdeckung harret.

Deshalb entsenden 2018 sowohl die NASA als auch die Europäische Raumfahrtagentur ESA neue Teleskope ins All. Währenddessen visieren irdische Observatorien solche Sterne an, die nicht in deren Blickfeld geraten werden. Und für die Zeit danach hat die ESA bereits PLATO in Planung, ein weiteres, hoch spezialisiertes Weltraumteleskop, das 2026 starten soll.

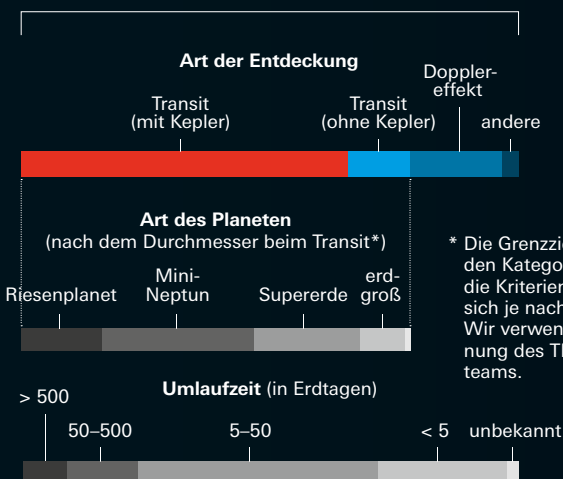
Einen Großteil unseres Wissens über Exoplaneten haben wir Kepler zu verdanken. Es hat seit seinem Start 2009 die Helligkeit von rund 150 000 Sternen in einem kleinen Ausschnitt des Himmels im Sternbild Schwan gemessen. Nach dem Ausfall von zwei Reaktionsrädern, die das Teleskop für seine präzise Ausrichtung benötigte, änderten die Missionsplaner 2013 die Beobachtungsstrategie. Selbst unter den verschlechterten Bedingungen gelang die Entdeckung weiterer Exoplaneten.

Dabei sind Bedeckungen eines Sterns durch Planeten statistisch gesehen eher selten. Nur wenige Prozent der anvisierten Sterne zeigen solchen verräterischen periodischen Einbrüche ihrer Helligkeit. Jeder weist auf einen

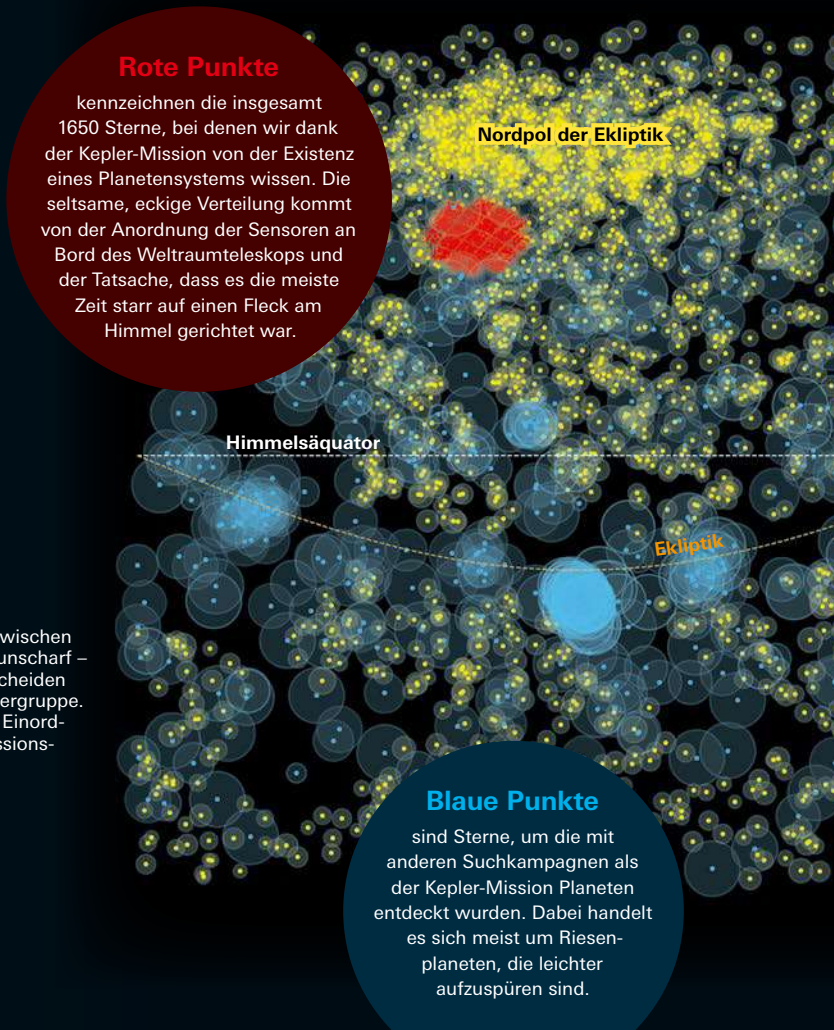
Volkszählung der Exoplaneten

Den ersten Planeten um einen anderen Stern haben Astronomen vor nicht einmal drei Jahrzehnten aufgespürt. Inzwischen umfasst der Katalog mehr als 3500 Exemplare. Doch selbst dabei dürfte es sich nur um einen winzigen Teil aller Exoplaneten handeln, die einer Entdeckung harren. Die meisten bisher bekannten Objekte kamen dem Weltraumteleskop Kepler vor die Linse. Die US-Mission TESS und der europäische Satellit CHEOPS sollen seine Nachfolge antreten.

Zahl bekannter Exoplaneten
(Stand vom 18. Dezember 2017): 3567



AMY WILKINSON: ROTE UND BLAUE PUNKTE NACH: NASA EXOPLANET ARCHIVE, EXOPLANETSCHULE BAC
 CATECHOR EDU, GEBE PUNKTE NACH: BOUMAS, I.G., WUJAL, J.N. ET AL.: PLANET DETECTION SIMULATIONS FOR
 SEVERAL POSSIBLE TESS EXTENDED MISSIONS. IN: ARXIV:1705.08894, 2017. SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2018



Planeten hin, dessen Umlaufbahn von allen möglichen Ausrichtungen zufällig gerade unsere Sichtlinie zu dem Stern kreuzt. Das Ausmaß, um das die scheinbare Leuchtkraft sinkt, verrät uns etwas über den Durchmesser des Planeten im Verhältnis zu dem des Sterns. Darum sind größere Himmelskörper auch viel einfacher auszumachen. Jupiter beispielsweise würde aus der Entfernung betrachtet die Sonne um etwa ein Prozent verdunkeln, während ihre Strahlung bei einem Transit der Erde lediglich um 0,01 Prozent schwächer wirken würde.

Geschwister von Erde oder Neptun

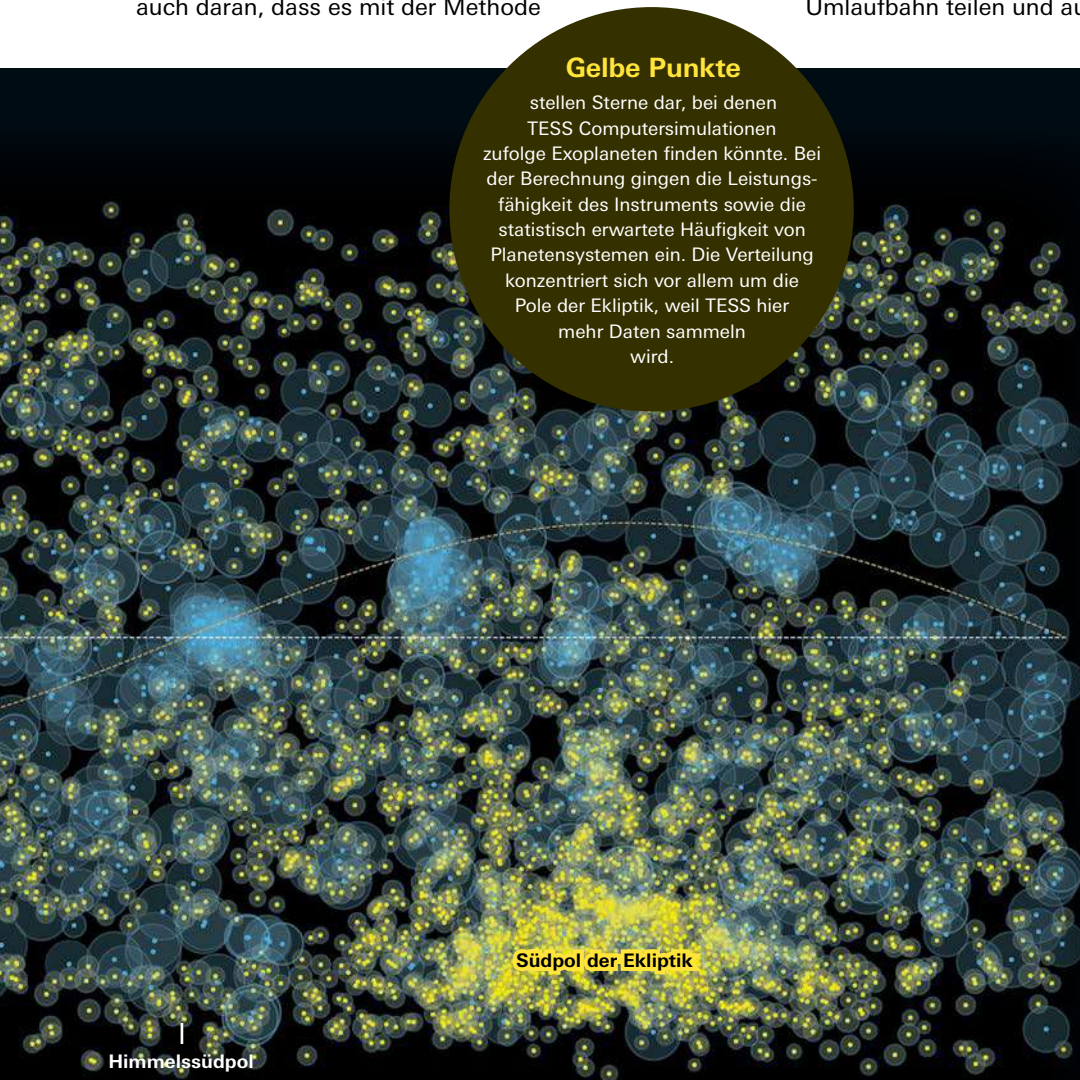
Die Mission Kepler hat etwa 5000 Kandidaten geliefert, von denen sich im Rahmen genauerer Untersuchungen mehr als 3500 tatsächlich als Exoplaneten herausgestellt haben. Die meisten davon fallen in eine von zwei Kategorien: Entweder sind sie im Durchmesser vergleichbar mit der Erde beziehungsweise etwas größer (»Supererden«), oder aber sie sind eine geringfügig kleinere Ausgabe des Gasplaneten Neptun (Mini-Neptuns).

Die von Kepler gefundenen Systeme enthalten zumeist nur einen bekannten Planeten, allerdings gibt es auch Hunderte mit mehreren. Diese Verteilung dürfte die natürlichen Verhältnisse nur zum Teil widerspiegeln. Das liegt auch daran, dass es mit der Methode

leichter ist, besonders große Planeten aufzuspüren, die nah um ihren Stern kreisen.

Unter den Funden gab es einige Überraschungen. Meiner Einschätzung nach dürfte die weitreichendste der Hinweis auf die Existenz von Miniaturausgaben unseres Sonnensystems sein. Hier drängen sich um einen Stern bis zu sechs Planeten in engen Umlaufbahnen, die weniger als dem Abstand zwischen Merkur und Sonne entsprechen. Solche Systeme sind so wichtig, weil sie häufig vorkommen: Pickt man sich irgendeinen sonnenähnlichen Stern am Nachthimmel heraus, beträgt die Wahrscheinlichkeit etwa 50 Prozent, dass er mindestens einen Planeten besitzt, der größer ist als die Erde und sich in einem Orbit kleiner als der des Merkurs befindet. Diese Erkenntnis kam vollkommen unverhofft. Gängige Modelle hatten sogar prognostiziert, solche Konstellationen seien ausgesprochen selten. Der Standardtheorie der Planetenentstehung fehlen offenbar einige Grundzutaten.

Einige der seltenen und exotischen mit Kepler gefundenen Planeten waren vorhergesagt worden – von Science-fiction-Autoren. Kepler-16b besitzt zwei Sonnen, ähnlich wie Luke Skywalkers Heimatplanet Tatooine aus dem Star Wars-Universum. Beim System Kepler-36 schließlich herrscht pures Chaos, da sich zwei Planeten praktisch eine Umlaufbahn teilen und auf völlig unvorhersehbare Weise

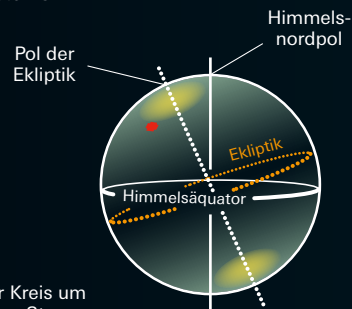


Gelbe Punkte

stellen Sterne dar, bei denen TESS Computersimulationen zufolge Exoplaneten finden könnte. Bei der Berechnung gingen die Leistungsfähigkeit des Instruments sowie die statistisch erwartete Häufigkeit von Planetensystemen ein. Die Verteilung konzentriert sich vor allem um die Pole der Ekliptik, weil TESS hier mehr Daten sammeln wird.

Eine Karte der Sterne

Jeder Punkt entspricht einem Stern. Sie sind entsprechend ihrer Rektaszension und Deklination aufgetragen, den beiden Koordinaten auf der Himmelskugel. Dazu kann man sich den Nachthimmel als Globus vorstellen, in dessen Zentrum die Erde liegt. Die Ekliptik ist die Ebene des Sonnensystems.



Der Kreis um jeden Stern kennzeichnet dessen auf der Erde wahrgenommene Helligkeit.

- sehr hell
- mit bloßem Auge gerade noch zu erkennen
- 100-mal schwächer
- 10 000-mal schwächer

JAN WILLEM TUIJF: ROTE UND BLAUE PUNKTE NACH: NASA EXOPLANET ARCHIVE (EXOPLANET ARCHIVE IPAC, CALTECH/UCSD); GELBE PUNKTE NACH: BRUNA, L.G., WINK, J.M. ET AL.: PLANET DETECTION SIMULATIONS FOR SEVERAL POSSIBLE TESS EXTENDED MISSIONS. IN: ARXIV:1705.08917, 2017 / SCENIPIO AMERICAN, MÄRZ 2018

wechselwirken. Ursprünglich wollten die Astronomen mit Kepler vor allem die alte Frage beantworten, wie typisch – oder selten – Planeten sind, die unserer Erde ähneln. Damit sind solche Objekte gemeint, die etwa die gleiche Größe und Masse besitzen und in einem Abstand um ihren Stern kreisen, der flüssiges Wasser auf der Oberfläche ermöglicht.

Kepler hat etwa ein Dutzend felsiger Planeten in dieser »habitablen Zone« gefunden. Alles, was wir nun zur Beantwortung der Frage tun müssen, ist eine simple Hochrechnung von den mit Kepler untersuchten Sternen – oder? Leider ist das nicht so einfach. Es ist alles andere als offensichtlich, wie viele der beobachteten Sterne so klein, hell und stabil sind, dass wir überhaupt eine Chance

haben, erdähnliche Planeten zu entdecken. Um die Zentralgestirne zu verstehen, müssen wir noch mehr Arbeit in die Datenanalyse stecken.

Trotz aller berechtigten Lorbeeren war die Kepler-Mission einer großen Einschränkung unterworfen: Das Teleskop hatte überwiegend einen festen, sehr kleinen Ausschnitt im Blick, nämlich bloß 2,5 Promille des Himmels. Nur durch viele sehr weit entfernte Sterne ließ sich in diesem Bereich eine ausreichend große Stichprobe sammeln. Ein typischer mit Kepler untersuchter Stern ist Tausende von Lichtjahren entfernt.

Derart unvorstellbar weitab liegende Ziele taugen für fantasievolle Geschichten bei öffentlichen Vorträgen, aber rein praktisch gesehen sind sie schlechte Untersu-

Rasterfahndung nach Planeten

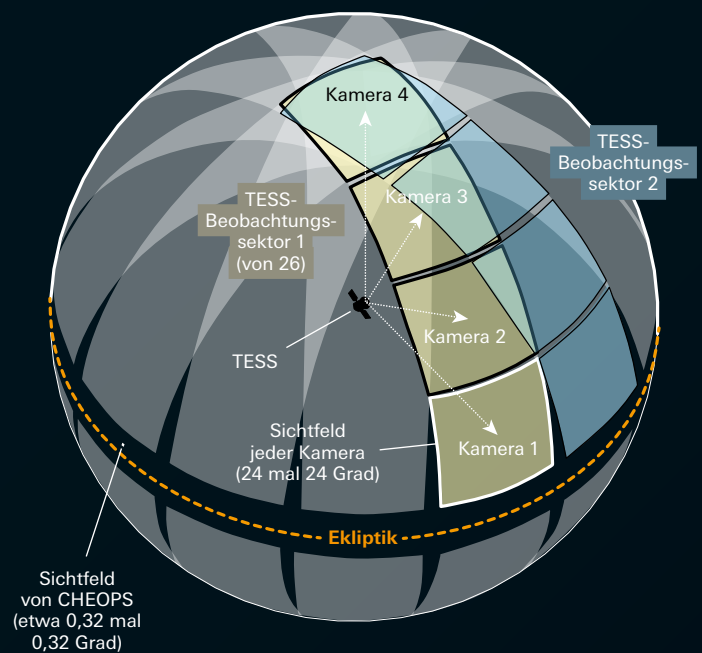
Nach dem Ende der Kepler-Mission werden zwei neue Raumsonden die Aufgabe übernehmen, unbekannte Exoplaneten aufzuspüren: der **Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)** und der **Characterising Exoplanet Satellite (CHEOPS)**.

Beobachtungsplan

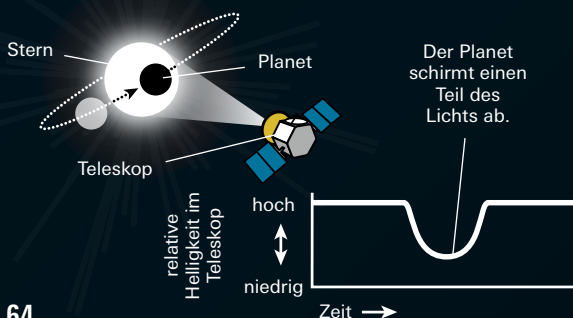
Während Kepler nur einen kleinen Bereich des Himmels anvisiert hatte, wird TESS mit vier Einzelteleskopen ein Sichtfeld von 24 mal 96 Grad abdecken. Um insgesamt etwa 90 Prozent der Himmelskugel zu durchmustern, wird während der geplanten Dauer der Mission jeden Monat einer von insgesamt 26 teilweise überlappenden Sektoren beobachtet. Im Gegensatz dazu wird CHEOPS einzelne Sterne betrachten, bei denen Astronomen bereits Hinweise auf Planeten haben.

Wie Forscher fündig werden

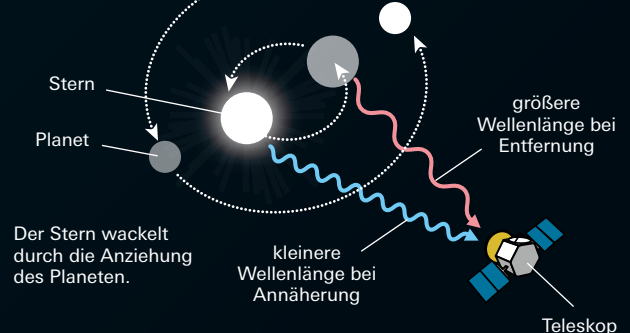
Die Weltraumteleskope Kepler, TESS und CHEOPS sind darauf ausgelegt, mit der Transitmethode (A) Planeten zu entdecken: Ziehen diese aus Sicht der Erde vor ihrem Stern vorbei, verdunkeln sie ihn zum Teil. Die Abschwächung des Lichts liefert Astronomen Hinweise auf die Größe des Planeten. Mit Hilfe des Dopplereffekts (B) verraten sich Himmelskörper, selbst wenn sie ihren Stern nicht verdunkeln. Infolge der wechselseitigen Anziehung bewegt sich der Stern während des Umlaufs hin und her, wodurch sich sein Licht regelmäßig zu roten und blauen Wellenlängen verschiebt.



A Transitmethode



B Dopplermethode



chungsobjekte. Sie leuchten von uns aus betrachtet nur schwach, was auf Kosten der Messgenauigkeit geht. Einige Parameter können wir so überhaupt nicht bestimmen, beispielsweise die Masse vieler der Planeten. Denn das Signal vom Transit liefert lediglich Informationen über den Durchmesser, doch keine über die Masse. Einzig beide Werte zusammen verraten, ob wir es mit einem dichten, felsigen Himmelskörper wie der Erde zu tun haben oder mit einem Gasriesen.

Üblicherweise bestimmen Astronomen die Masse eines Planeten, indem sie messen, wie stark sein Gravitationsfeld den Stern beschleunigt. Dazu nutzen sie den Dopplereffekt, der die Wellenlängen des ausgesandten Lichts je nach Bewegungsrichtung staucht oder streckt. So lassen sich übrigens auch Planeten finden, die keine Transits vollführen, also ihren Stern nicht in der Ebene unserer Blickrichtung umkreisen. Diese Methode erfordert aber höchst präzise Spektroskopie. Dabei wird das Sternenlicht regenbogenartig aufgefächert und bei mindestens 50 000 einzelnen Wellenlängen untersucht. Die Strahlung schwach leuchtender Sterne lässt sich nicht derart fein in ihre Bestandteile zerlegen.

Stück für Stück den ganzen Himmel im Blick

Diese Beschränkungen der Kepler-Mission will die NASA mit ihrem nächsten Planetenjäger umgehen, dem Transiting Survey Satellite (TESS). An Bord des Satelliten befinden sich vier Zehn-Zentimeter-Teleskope. Das entspricht jeweils nur einem Zehntel von Keplers Spiegeldurchmesser und erscheint insofern seltsam, schließlich sind wir von astronomischen Instrumenten eine Entwicklung hin zu immer größeren Geräten gewohnt. Ein kleineres Teleskop kann allerdings auch Vorteile haben, denn es ermöglicht ein breiteres Sichtfeld. So blickt jede Kamera von TESS auf fast sechsmal so viel Raumfläche wie Kepler; zudem wird sich TESS drehen und in verschiedenen Himmelsabschnitten nach Planeten suchen. Insgesamt dürfte TESS vor allem wesentlich mehr helle Sterne beobachten als die wenigen, die in Keplers eng begrenztem Sichtfeld lagen.

Nach seinem zwischen April und Juni 2018 geplanten Start wird TESS zwei Jahre lang etwa 90 Prozent des Himmels durchmustern. Dazu wird dieser in 26 teilweise überlappende Bereiche aufgeteilt, die jeweils rund einen Monat im Blickfeld liegen. Ähnlich wie bei Kepler erwarten wir die Entdeckung tausender neuer Exoplaneten, jedoch werden sie Sterne umkreisen, die zirka 30-mal so hell sind. Das könnte sich als Segen für Nachfolgeuntersuchungen mit erdgebundenen Teleskopen erweisen – im Vergleich zu den Kampagnen bei Kepler-Planeten dürfte es wirken, als wären die Geräte plötzlich um den Faktor 30 leistungsfähiger.

Kurz nach TESS steht außerdem eine europäische Mission in den Startlöchern: Der Characterising Exoplanet Satellite (CHEOPS) soll Ende 2018 abheben. Er ist mit einem einzelnen, 32 Zentimeter großen Teleskop ausgestattet. CHEOPS hat ein anderes Missionsprofil als TESS, und beide ergänzen sich hervorragend. Während TESS den Himmel systematisch nach einem vorgegebenen Schema durchforstet, wird CHEOPS bestimmte Sterne

genauer untersuchen, bei denen es bereits erste Anzeichen für Planetensysteme gibt.

Beispielsweise könnten in den Daten von TESS interessante, aber statistisch betrachtet uneindeutige Hinweise auf mögliche Himmelskörper auftauchen. Dann würde ich oder jemand anderes aus dem TESS-Team zum sprichwörtlichen heißen Draht greifen, der uns mit den Kollegen von CHEOPS verbindet, und fragen, ob sie genauer hinschauen möchten. Bei nahen Sternen wie Ross 128 und Proxima Centauri, wo Forscher dank der erwähnten Methode der Dopplerspektroskopie schon Beweise für Planeten haben, könnte CHEOPS prüfen, ob diese oder etwaige weitere Himmelskörper ihren Stern bedecken. Hier ist allerdings eine Menge Glück nötig, denn rein rechnerisch ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass wir gerade zufällig aus der richtigen Richtung auf die Sterne blicken. Im Fall von Proxima Centauri beträgt die Chance, Planeten davor herziehen zu sehen, gerade einmal 1,4 Prozent. Aber für den Einsatz wertvoller Beobachtungszeit winkt ein hoher möglicher Gewinn – wir können auf die Weise enorm viel über einen Planeten lernen.

Die neuen Werkzeuge haben auch ihre Schattenseiten. Die Experten möchten eigentlich verfolgen, wie sich die kurzzeitige Leuchtkraftabnahme eines Sterns einmal oder idealerweise mehrmals wiederholt. So gehen sie sicher, dass der Effekt von einem Planeten verursacht wurde und nicht beispielsweise von einem Instrumentenfehler. Jedoch liegen die meisten der von TESS untersuchten Sterne nur einen Monat im Sichtbereich der Kamera. Das reicht längst nicht, um ein Objekt wie die Erde zu finden, die bekanntlich ein Jahr für einen Umlauf braucht. Bloß ein paar Prozent des Himmels werden in überlappenden Abschnitten liegen und bis zu einem Jahr im Blick sein. Selbst das kann mit Keplers vierjähriger Beobachtungsphase nicht mithalten.

Daher werden wir mit TESS vor allem Planeten entdecken, die ihren Stern sehr schnell und eng innerhalb weniger Wochen umrunden. Das ist nicht ideal, war aber der Kompromiss, den wir eingehen mussten, um im Budget von 228 Millionen Dollar zu bleiben. Diese Zugeständnisse erschienen uns akzeptabel, da wir von Kepler bereits wussten, dass in diesen kurzperiodischen Umlaufbahnen vielfältige Welten existieren: Lavakugeln, poröse Objekte, chaotische Systeme und sogar Körper, die gerade auseinanderbrechen. Mit TESS werden wir die uns am nächsten gelegenen exotischen Planeten finden. Auf einen wirklich erdähnlichen Planeten um einen Stern wie die Sonne werden wir noch warten müssen.

Die NASA-Mission ist dennoch ein wichtiger Zwischenschritt bei der langen Suche nach Leben auf anderen Planeten. Wir schätzen, dass TESS ähnlich viele Planeten in der habitablen Zone finden wird wie Kepler, also etwa ein Dutzend. Der Trick: Wir dürfen uns nicht auf sonnenähnliche Sterne versteifen. Astronomen bezeichnen unsere Sonne gern als typischen Stern, der sich von vielen hundert Milliarden weiteren in der Milchstraße nicht groß unterscheidet. Das ist ein wenig geflunkert. Die meisten Sterne sind so genannte Rote Zwerge: kältere, nicht so leuchtstarke Exemplare mit weniger als der halben Masse

unserer in dieser Hinsicht überdurchschnittlichen Sonne. Ein Roter Zwerg wirkt neben ihr wie eine Kerze neben einem Scheinwerfer.

Entsprechend näher muss man an das Licht herantreten, um sich daran zu wärmen. So liegt die habitable Zone eines Roten Zwergs in einem Bereich, in dem die Umlaufdauern kurz sind. Bei einem Roten Zwerg mit einem Fünftel der Sonnenmasse würden solche Planeten gerade einmal wenige Wochen benötigen. Das liegt genau im Beuteschema von TESS. Kepler hat ein paar tausend Rote Zwerge beobachtet, und seinen Daten zufolge scharen sich um diesen Typ Stern sogar noch mehr Planeten als um solche, die unserer Sonne ähneln. Unter den Hunderttausenden von Sternen, die TESS anvisieren wird, sind rund 50 000 Rote Zwerge. Ihre geringe Leuchtkraft machen sie durch kleine Durchmesser mehr als wieder wett, denn dadurch schirmen umlaufende Planeten einen größeren Teil der strahlenden Scheibe ab. Das erzeugt einen deutlicher wahrnehmbaren Helligkeitseinbruch. Theoretisch lässt sich beispielsweise ein Planet genauso gut detektieren, wenn der Stern zwar 16-mal schwächer leuchtet, aber nur halb so groß ist. Tatsächlich sind Planeten vor einem Roten Zwerg so klar zu erkennen, dass dafür nicht einmal ein Weltraumteleskop nötig ist.

Irdische Suche nach außerirdischem Leben

Deswegen laufen bereits mehrere Projekte an erdgebundenen Teleskopen, die sich der Jagd auf Planeten um Rote Zwerge verschrieben haben. Wegen der geringen Helligkeit der Sterne kommen dafür nur leistungsfähige Observatorien in Frage, die viel Licht einfangen, jedoch immer nur ein einzelnes Objekt ins Visier nehmen können. Das macht die Angelegenheit langwierig und wenig effizient: Nach einem Jahrzehnt derartiger Suchkampagnen wurden bisher lediglich drei Planetensysteme gefunden. Dafür waren diese Entdeckungen sensationell und haben 2017 im Fall von TRAPPIST-1 sogar für Meldungen auf Titelseiten von Zeitungen gesorgt. Das Miniatursystem besteht aus sieben etwa erdgroßen Himmelskörpern im Orbit um ein sehr massearmes Objekt, das gerade noch als Stern durchgeht. Mindestens zwei der Planeten kreisen in der habitablen Zone.

Wir werden mit Hilfe aller Missionen und Nachfolgestudien in absehbarer Zeit Tausende von Planeten identifiziert und näher untersucht haben, viel über Planetenbildung gelernt und mit etwas Glück eine wachsende Sammlung von Himmelskörpern anlegen, die etwa erdgroß und potenziell lebensfreundlich sind. Und dann? Wie können wir den nächsten Schritt gehen und herausfinden, ob diese Planeten tatsächlich belebt sind?

Ein seit den 1950er Jahren diskutierter Ansatz besteht darin, Radioteleskope auf den betreffenden Stern auszurichten und auf die Signale einer intelligenten Alien-Zivilisation zu hoffen. Das ist zwar immerhin ein gut durchführbarer Plan, aber über die Erfolgsaussichten lässt sich nichts sagen.

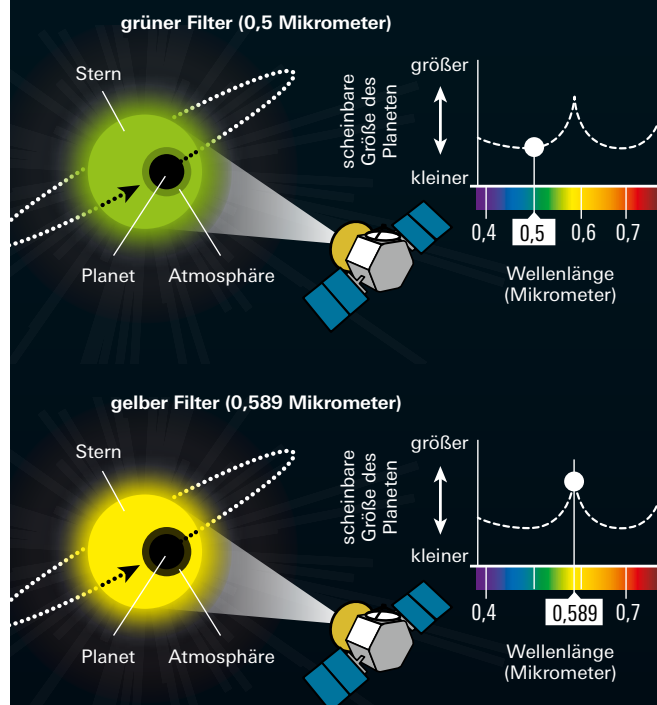
Eine andere Strategie setzt auf die Analyse der Atmosphäre der Exoplaneten und die Suche nach Anzeichen für Leben. Dabei nutzen die Astronomen den Transit für

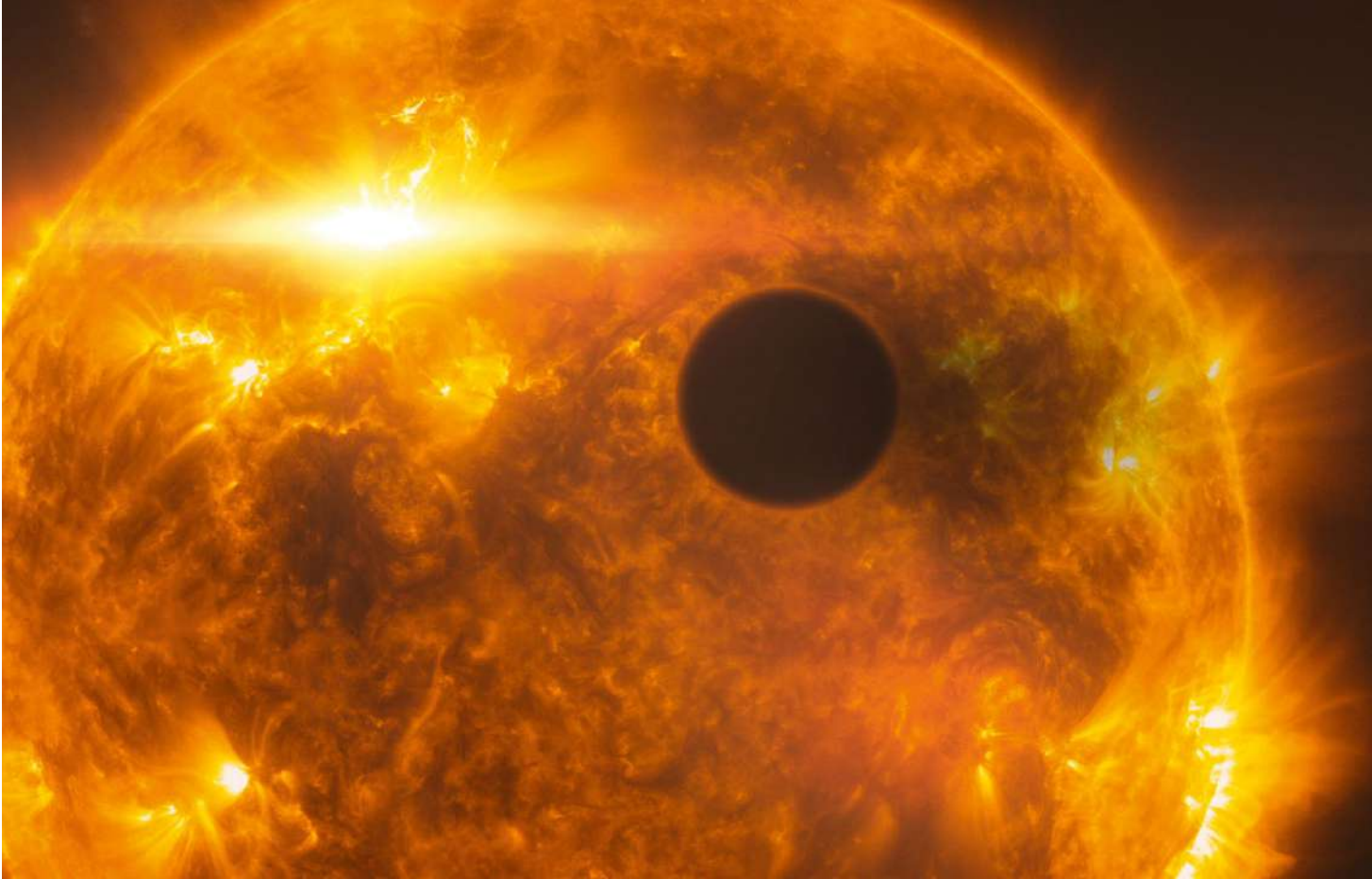
einen Trick: Die äußeren Schichten der Atmosphäre lassen einen Teil des Sternenlichts hindurch, das wir daraufhin mit unseren Teleskopen auffangen und spektral analysieren können. Jedes Atom oder Molekül absorbiert auf charakteristische Weise Licht bestimmter Wellenlängen. Wenn man nun das Spektrum des Sterns vor, während und nach einem Transit genügend präzise aufzeichnet und auswertet, kann man die Unterschiede zum unveränderten Sternenlicht berechnen (siehe »Trickreich mit Transits Atmosphären analysieren«, unten).

Bislang haben Astronomen das bei Planeten von der Größe Jupiters und sogar bei einigen vom Format Neptuns und des Uranus geschafft. Dabei fanden sie Moleküle wie Methan, Kohlenmonoxid und Wasser. Bei Himmelskörpern mit dem Durchmesser der Erde ist das noch nie gelungen, weil die wenigen bekannten entsprechenden Objekte um Sterne kreisen, die zu weit entfernt und zu leuchtschwach sind, um ein ausreichend starkes Signal zu liefern. Sollten wir bei einem solchen Planeten jemals Sauerstoff finden, ließe das sicher den Adrenalinspiegel vieler Forscher in die Höhe schießen. Sauerstoff gilt als starker Hinweis auf

Trickreich mit Transits Atmosphären analysieren

Exoplaneten geben beim Vorbeiziehen vor ihrem Stern manchmal nicht bloß ihre Anwesenheit preis, sondern auch die Zusammensetzung ihrer Gashölle. Ein Teil des Lichts durchdringt diese, wobei jedes Atom und jedes Molekül charakteristische Wellenlängen absorbiert. Astronomen können mit Farbfiltern die entsprechenden Wellenlängen identifizieren: In diesen Bereichen des Spektrums erscheint der Planet größer, weil die Atmosphäre das Licht blockiert.





Transitbeobachtungen des Gasplaneten HD 189733 b vor seinem nur 63 Lichtjahre von uns entfernten Stern (hier illustriert) lieferten Details über die Planetenatmosphäre.

biologische Aktivitäten – verschwände plötzlich alles Leben auf der Erde, würde ihre Gesteinskruste den Sauerstoff innerhalb weniger Millionen Jahre in Form von Oxiden an sich binden.

Insofern arbeiten TESS und CHEOPS der nächsten Generation von Weltraumteleskopen zu, allen voran dem James Webb Space Telescope, das 2019 starten soll. Es wird das mit Abstand leistungsfähigste Instrument für die Spektroskopie bei Transits sein. Aber da seine Lebensdauer wegen des begrenzten Treibstoffvorrats nur zwischen fünf und zehn Jahren betragen wird, ist Eile auf der Suche nach den besten und hellsten Zielobjekten geboten. Zudem ist die verfügbare Beobachtungszeit des Teleskops hart umkämpft.

Deswegen haben sich Exoplanetenforscher zusammengesetzt und spezialisierte Geräte entworfen, die nichts anderes als Transitspektroskopie betreiben sollen. Sowohl im Akronym der NASA-Mission FINESSE als auch im Namen ihres ESA-Pendants ARIEL steckt ein »I« für Infrarotstrahlung, da sich Moleküle wie Wasser und Kohlendioxid in diesem Wellenlängenbereich am besten aufspüren lassen.

Noch weiter in die Zukunft erstrecken sich die Pläne für das europäische Projekt PLATO. Die Raumsonde könnte 2026 starten und ist gewissermaßen ein Super-TESS mit 24 statt vier Einzelteleskopen. PLATO soll nicht nur mit größerer Empfindlichkeit und über einen längeren Zeit-

raum nach Planeten suchen als seine Vorgänger, sondern wird darüber hinaus so gut aufgelöste Daten liefern, dass es möglich wird, Schwingungen innerhalb der Sterne selbst zu erkennen. Denn Sterne werden immer wieder durch Beben und Stoßwellen infolge der im Kern ablaufenden Fusionsprozesse erschüttert. Die Untersuchung dieses Phänomens wird Asteroseismologie genannt. Sie liefert Details über die innere Struktur und somit über wichtige Parameter des Sterns, etwa dessen Alter. Das wiederum erlaubt uns, verschiedene Exemplare auf einer Zeitskala einzuordnen – obwohl wir einzelne von ihnen, gemessen an kosmischen Maßstäben, immer nur zu einem winzigen Augenblick in ihrer Entwicklung zu sehen bekommen. Sofern sich dann außerdem Planeten im Orbit befinden, können Astronomen generell etwas über die Evolution solcher Systeme lernen.

Mit den noch immer laufenden Analysen der Kepler-Daten und den Vorbereitungen auf die verschiedenen zukünftigen Missionen sind die Terminkalender der Exoplanetenjäger auf lange Zeit gut gefüllt. Vor ihnen liegt ein unermesslich großes Feld, und sie sind gerade einmal die ersten Schritte gegangen. All die angehenden Wissenschaftler, die von dem Spektakel einer irdischen Sonnenfinsternis hoffentlich für die Astronomie begeistert wurden, können in Zukunft jede Menge außerirdische Sternverdunkelungen bewundern und untersuchen. ◀

QUELLE

Ricker, G. R. et al.: Transiting Exoplanet Survey Satellite. In: Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 1, 014003, 2015.

SCHLICHTING! BIZARRE UNTERWASSER- SCHATTEN



H. JOACHIM SCHLICHTING



Objekte, die auf flachen Gewässern driften, werfen oft völlig andere Schatten, als ihre tatsächlichen Umrisse vermuten lassen. Das verblüffende Phänomen erklärt sich durch unscheinbare Dellen in der Wasseroberfläche.

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/1555488

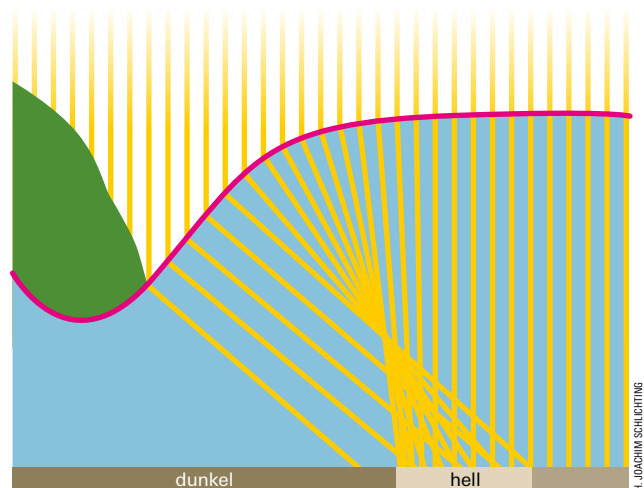
Wenn du alle Formen der Gewässer gut unterscheiden willst, dann betrachte klares Wasser von geringer Tiefe unter den Sonnenstrahlen

Leonardo da Vinci (1452–1519)

Bei Blättern und anderen Objekten, die auf einem flachen Teich oder einer Pfütze schwimmen, ist die auf den Boden geworfene Silhouette des Schattens in vielen Fällen eine völlig andere als die des Originals. Außerdem zielt eine leuchtende Umrahmung die kurios verzerrten Schatten, als hätte jemand den Umriss mit einem hellen Stift nachgezogen.

Das lässt sich beispielsweise bei Seerosenblättern auf relativ klarem Wasser beobachten (siehe großes Bild oben). Die Schatten scheinen sich überhaupt nicht um die Form des jeweiligen Blatts zu kümmern und bedienen sich scheinbar frei aus dem Repertoire möglicher Konturen. Was über dem Gewässer als glatt und rund daherkommt, ist auf dessen Boden gefiedert – als wäre hier das Abbild eines ganz anderen Blatts zu sehen. Das ist auf den ersten Blick ebenso schön wie rätselhaft.

Dieser frappierende Wandel ist das Resultat einer subtilen Wechselwirkung zwischen der Blattkrempe und der Wasseroberfläche. Seerosenblätter verfügen über ein luftgefülltes Gewebe, das sie schwimmfähig macht. Sie liegen meist flach im Teich und sind nach außen hin leicht gewellt. Darum tauchen sie mit dem Rand abwechselnd ein und erheben sich. Das Gewebe hat eine



H. JOACHIM SCHLICHTING

In der vereinfachten Darstellung krümmt ein Blatt die Wasseroberfläche (rot dargestellt). Sie bricht einfallendes Licht zu einer hellen Linie um einen dunkleren Bereich.

Wasser liebende Unterseite und eine vergleichsweise abweisende Oberseite, so dass die Wasseroberfläche am Blattsaum fixiert bleibt und dabei abwechselnd etwas eingedellt (konvexer Meniskus) und angehoben (konkaver Meniskus) wird.

Diese Krümmungen beeinflussen den Weg des Sonnenlichts ins Wasser hinein. Aber wie genau gelangen die Strahlen an einigen Stellen dem Anschein nach unter das Blatt? Vielleicht von dort, wo es nach oben gewölbt



Kleine Krüselungen am Rand eines Blatts auf einer Wasseroberfläche verändern die Form des daruntergeworfenen Schattens erheblich.

H. JOACHIM SCHLICHTING



ist? Doch ein konkaver Meniskus zerstreut Licht und verteilt es über eine größere Fläche. Würden die Zwischenräume so entstehen, sollte die Helligkeit in ihnen wesentlich geringer sein. Diesen Effekt sehen wir aber nicht, zumal der Rand des Schattens von einer intensiven Brennlinie begrenzt ist. Außerdem müsste durch derartige Einschnürungen der geometrische Schattenbereich kleiner sein als das Blatt. Tatsächlich ist das gefiederte Abbild sogar ausgedehnter – der eigentliche Schatten wird also durch runde Ausbuchtungen erweitert.

Entscheidend dafür sind die Dellen im Wasser durch die abgesenkten Bereiche der Blattkante. Diese sind von einem konvexen Meniskus umgeben. Eine solche Krüm-

Dort, wo ein Wasserläufer die Oberfläche mit seinen dünnen Beinen herunterdrückt, erzeugt er große, runde Schatten.



OSIVA / GETTY IMAGES / ISTOCK

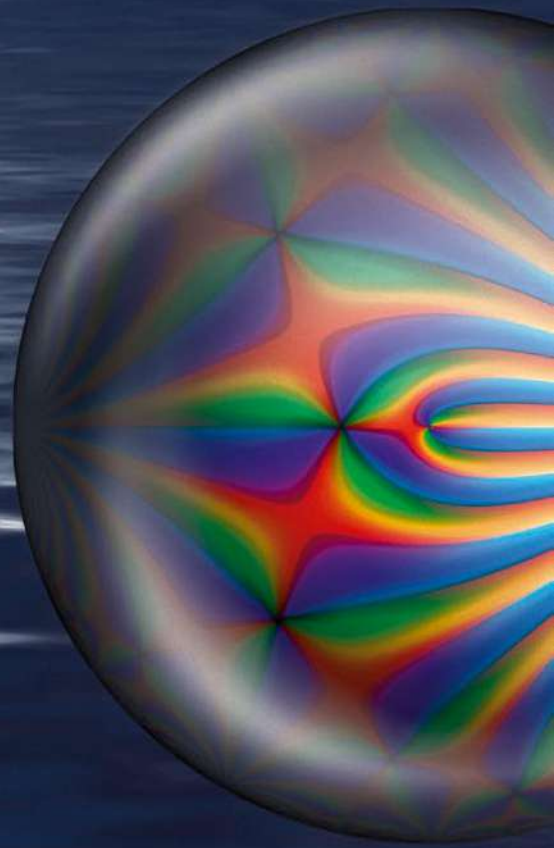
In einer flachen Schale wirft ein eng gewelltes Seerosenblatt eine besonders filigran ausgebuchtete Silhouette. Jeder Schattenbauch entspricht einem konvexen Meniskus, also einer Delle unter dem mittleren Oberflächenniveau.

mung bricht das Licht nach außen hin, vergrößert den Schatten entsprechend und erzeugt eine Brennlinie am Rand (siehe Illustration, linke Seite).

Das Phänomen ist nicht auf Seerosen beschränkt. In eine Pfütze gefallenes Laub ruft dasselbe optische Phänomen hervor. Besonders eindrucksvoll wird der Effekt allerdings, wenn Wasserläufer die Teichoberfläche tief eindrücken. Die eigentliche Silhouette des Körpers, insbesondere der dünnen Beinchen, erscheint im Vergleich zu den ovalen Schatten der Wasserdellen geradezu winzig (siehe Foto links).

Sie können die Zusammenhänge sehr einfach selbst untersuchen. Dazu müssen Sie nur eine flache Schale mit Wasser füllen und ein schwimmfähiges Blatt auf die Oberfläche legen. Im Licht der Sonne oder einer Lampe entstehen dann je nach der Welligkeit des Objekts hell umkränzte, gefiederte Schatten (siehe Bild oben rechts). Um sich die Zuordnung zu den Wellenbergen und -tälern vor Augen zu führen, können Sie mit einem dünnen Stift oder einer Nadel am Saum entlangfahren und die dazu gehörigen Schattengrenzen verfolgen.

Der Übergang des Lichts von der Luft ins Wasser erzeugt oft erstaunliche optische Deformationen (siehe »Wenn der Pool ins Schwimmen gerät«, **Spektrum** Februar 2009, S. 45). Die Transparenz des Wassers suggeriert, die Ursachen seien im Wortsinn leicht zu durchschauen – dabei lenkt sie manchmal vielmehr von den wichtigen Vorgängen an der Grenzfläche ab. Das gilt offenbar besonders für die Schatten von darauf driftenden Gegenständen. Auf den ersten Blick erkennt man die Unterschiede in der Eintauchtiefe kaum und ahnt somit nichts vom Grund der seltsamen Lichtablenkung. Da wir so etwas aus unserem Alltag an der Luft nicht kennen, werden Unterwasserschatten zu einem besonders kuriosen Phänomen. ◀



WASSERSPIEGELUNG: ANDREOTTI / GETTY IMAGES / ISTOCK; STACHELMOND: CHARL_VBK / GETTY IMAGES /
ISTOCK; GEOMETRISCHE KÖRPER LINKS: WACOMMA / GETTY IMAGES / ISTOCK; J-FUNKTION RECHTS: FREDRIK
JOHANSSON; GLASSPHÄRE: FOSINZ / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBETUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

MATHEMATIK BRÜCKENBAU FÜR EINZELGÄNGER

Neue Forschungen offenbaren eine überraschende Verbindung zwischen einer rätselhaften Gruppe und einer bekannten Funktion – womöglich könnte die Stringtheorie diesen Zusammenhang erklären.



Manon Bischoff ist theoretische Physikerin und Volontärin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

» spektrum.de/artikel/1555490

► Zwei Gebiete der Mathematik haben auf den ersten Blick nichts miteinander zu tun: Auf der einen, der »diskreten« Seite, ist das Reich der endlichen Gruppen. Hier bewegt man einen Gegenstand ruckweise, dreht ihn ein Stück und stellt fest, dass er genauso aussieht wie zuvor. Auf der anderen Seite gibt es die differenzierbaren Funktionen, bei denen alles darauf ankommt, dass beliebig kleine Bewegungen möglich sind und ihr Verlauf glatt ist.

In der diskreten Welt haust das so genannte Monster: eine komplizierte endliche Gruppe, mit der Mathematiker lange Zeit nichts anzufangen wussten. Auf dem kontinuierlichen Ufer gibt es dagegen besonders schöne Funktionen, deren prominentester Vertreter, die »j-Funktion«, bereits vielfältige Anwendungen fand.

Dass zwischen der diskreten und der kontinuierlichen Seite ein Zusammenhang bestehen könnte, ist zunächst nicht wirklich naheliegend. Aber es gibt Brücken, die beide so fern scheinenden Bereiche verbinden. Die erste hat der britisch-kanadische Mathematiker John McKay bereits 1979 entdeckt: Er identifizierte die j-Funktion als Partnerin des Monsters. Dieser Zusammenhang verblüffte Wissenschaftler so sehr, dass sie ihn »Mondschein-Verbindung« nannten. Das Wort »moonshine« bezeichnet neben illegal hergestellten Spirituosen auch etwas Verrücktes.

13 Jahre später enthüllte Richard Ewen Borcherds die Brücke zwischen dem Monster und der j-Funktion: Ein gänzlich anderes, aus der Physik stammendes Gebiet – die Stringtheorie – verbindet beide Ufer. Inzwischen sind etliche weitere Mondschein-Verbindungen hinzugekommen, die einer endlichen Gruppe eine differenzierbare

Funktion zuordnen. Isoliert blieben dabei stets die merkwürdigen Einzelgänger der diskreten Seite: die »Paria«.

Nun hat aber der Mathematiker Ken Ono (siehe **Spektrum** August 2015, S. 56) mit zwei seiner Kollegen erstmals die Verbindung gefunden, die einer endlichen Paria-Gruppe den Weg ins Kontinuierliche bahnt.

Im Allgemeinen ist eine mathematische Gruppe nichts weiter als eine Menge, in der man je zwei Elemente zu einem dritten verknüpfen kann. Was diese Elemente genau sind, bleibt dabei offen. Häufig stellt man sie sich jedoch als Symmetrietransformationen vor: Abbildungen, die ein geometrisches Objekt unverändert lassen (siehe »Gruppentheorie für Einsteiger«, S. 72). Deswegen versuchen Mathematiker gerade große, undurchschaubare Gruppen als Symmetriegruppen aus Drehungen oder Spiegelungen aufzufassen. Man sucht also zu einer gegebenen Gruppe eine »Darstellung«. Das ist eine Menge von Drehungen und Spiegelungen in einem möglicherweise hochdimensionalen Raum mit der gleichen Gruppenstruktur – zumindest teilweise.

AUF EINEN BLICK MONDSCHN FÜR AUSSENSEITER

- 1** Endliche einfache Gruppen und differenzierbare Funktionen scheinen nicht viel gemeinsam zu haben, doch die Stringtheorie verbindet einige ihrer prominentesten Vertreter.
- 2** Nun haben Forscher den kontinuierlichen Partner von einer der rätselhaftesten und isoliertesten endlichen Gruppen gefunden.
- 3** Inwiefern eine physikalische Theorie diese lange gesuchte »Mondschein-Verbindung« erklären kann, ist allerdings noch unklar.

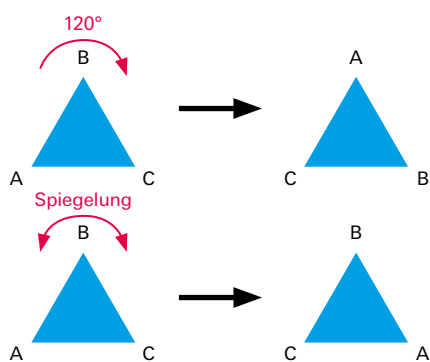
Zwei Gruppen zu einer größeren zusammensetzen, ist nicht schwer. Beide Komponenten sind dann als Untergruppen (Teilmengen, die ihrerseits Gruppen sind) in der größeren enthalten. Andererseits kann eine Gruppe zwar Untergruppen enthalten, ist aber deswegen noch nicht in diese Bausteine zerlegbar. Solche Gruppen bezeichnet man als »einfach«, sie sind so etwas wie die Atome der Gruppentheorie.

Bereits 1892 formulierte der Mathematiker Otto Hölder ein ehrgeiziges Ziel: Er wollte alle endlichen und einfachen Gruppen klassifizieren (siehe **Spektrum** März 2016, S. 48), ähnlich den chemischen Elementen im Periodensystem.

Gruppentheorie für Einsteiger

Am einfachsten stellt man sich eine Gruppe als Menge von Symmetrietransformationen vor. Rotiert man beispielsweise ein gleichseitiges Dreieck um 120° , ändert sich dessen Form nicht. Ein solches Dreieck kann um insgesamt drei Winkel gedreht werden (0° , 120° und 240°). Jede dieser Drehungen ist eine Symmetrietransformation. Zusammen bilden sie eine endliche Gruppe. Neben den Drehungen kann das Dreieck auch entlang seiner Mittelachse gespiegelt werden. Die genannten Drehungen und Spiegelungen bilden jeweils für sich endliche Untergruppen der gesamten Symmetriegruppe des Dreiecks.

Streng genommen ist eine Gruppe aber abstrakter definiert. Ihre Elemente müssen lediglich den Gruppenaxiomen genügen: Die Verknüpfung (beispielsweise Addition oder Multiplikation) zweier Elemente muss wieder ein Gruppenelement ergeben. Jede Gruppe enthält ein »neutrales Element«, das jedes andere unverändert lässt, wie etwa die Multiplikation mit eins oder die Addition mit null. Darüber hinaus muss jedes Element auch ein Gegenstück (»inverses Element«) besitzen, so dass die Verknüpfung beider wieder das neutrale erzeugt – unter der Multiplikation wäre beispielsweise $\frac{1}{2}$ das Gegenstück zu 2. Somit bilden die rationalen Zahlen ohne null mit der Multiplikation eine Gruppe, ebenso wie die ganzen Zahlen unter Addition.



Unter großem Aufwand gelang es unzähligen Wissenschaftlern in jahrzehntelanger Arbeit, Hölders Vision umzusetzen. In über 500 Veröffentlichungen, die sich auf mehr als 10000 Seiten verteilen, zeigten sie 1983, dass sich alle endlichen einfachen Gruppen in drei Klassen einordnen lassen – bis auf 26 Ausnahmen, die »sporadischen Gruppen« (siehe »Endliche einfache Gruppen«, S. 74). Sie stellten die Mathematiker lange Zeit vor ein Rätsel.

Diese Außenseiter wirkten wie ein Makel in der sonst so schönen Gruppentheorie. Sie bildeten keine richtige Familie und traten weder in weiteren mathematischen Theorien noch in anderen Naturwissenschaften auf. Die größte unter ihnen, das bereits erwähnte Monster, besteht aus etwa $8 \cdot 10^{53}$ Elementen; das entspricht der 8000-fachen Anzahl aller Atome auf der Erde. Stellt man das Monster durch eine Symmetriegruppe dar, so ist sie entweder eindimensional – und enthält keine relevanten Eigenschaften des Monsters – oder sie hat mindestens 192883 Dimensionen. Ein Objekt, das einen Teil der diskreten Monstersymmetrien besitzt, ist also wenigstens 192883-dimensional und damit völlig unvorstellbar, wenn man bedenkt, dass schon vier Dimensionen das menschliche Anschauungsvermögen überfordern.

Die schöne j-Funktion und das Monster

Obwohl die Mathematiker Bernd Fischer und Robert Griess schon 1973 die Existenz des Monsters postulierten, dauerte es neun Jahre, bis Griess die diskrete Gruppe konstruierte und damit ihre Existenz endgültig bewies. Daraufhin konnte man die sporadischen Gruppen weiter kategorisieren: Das Monster enthält 19 von ihnen als Untergruppen. Die übrigen sechs sind die Außenseiter der Außenseiter-Gruppen: die so genannten Parias.

Bereits Ende der 1970er Jahre fand ein Teil der sporadischen Gruppen erstmals Anschluss an ein anderes mathematisches Gebiet. Der zuvor erwähnte Mathematiker McKay hatte – noch bevor Griess bewiesen hatte, dass das Monster überhaupt existiert – eine Verbindung zwischen dem Monster und der j-Funktion vermutet.

Im Gegensatz zu dem schüchternen Monster, das sich isoliert in den hinteren Ecken der endlichen Gruppentheorien aufhielt, ist die j-Funktion eine mathematische Berühmtheit und taucht wegen ihrer besonderen Eigenschaften in mehreren Gebieten auf. Sie gehört nämlich zu den so genannten Modulformen, die bezüglich der Modulgruppe symmetrisch sind (siehe »Die j-Funktion«, rechts), und ist gleichzeitig eines der Vorzeigeelemente dieser Funktionenklasse: Alle anderen Modulformen lassen sich durch sie ausdrücken. Andrew Wiles bewies 1993 mit Hilfe der j-Funktion Fermats Großes Theorem (siehe **Spektrum** August 1993, S. 14) und zeigte damit, dass Modulformen eng mit anderen mathematischen Bereichen wie der Zahlentheorie zusammenhängen.

Die j-Funktion erregte auch die Aufmerksamkeit McKays, der sich eigentlich hauptsächlich mit dem Monster beschäftigte. Er stolperte über eine Veröffentlichung, in der die Autoren die j-Funktion als Summe unterschiedlicher Frequenzen darstellten: Wie man den Ton eines Instruments in einzelne Obertöne zerlegen kann, ist dies

Symmetrisch bezüglich der Modulgruppe: Die j-Funktion

Anders als reelle Funktionen, die reelle Zahlen auf sich selbst abbilden, ist die j-Funktion komplex und bildet dementsprechend komplexe Zahlen auf sich selbst ab. Die komplexen Zahlen enthalten neben den reellen auch die imaginären Zahlen: die Wurzeln negativer Zahlen. Um komplexe Zahlen grafisch darzustellen, nutzt man einen Trick: Man trägt den reellen Wert auf der x-Achse und den imaginären Teil auf der y-Achse auf. Jede komplexe Zahl

entspricht also einem Punkt in der x-y-Ebene. Der Wert einer komplexen Funktion an einer bestimmten Stelle kann dann farblich kodiert werden.

Es genügt ein kleiner Ausschnitt der x-y-Ebene, um die gesamte j-Funktion zu charakterisieren: In der Abbildung kann man bereits unzählige Gebiete erkennen, in denen die Funktion immer wieder dieselben Werte annimmt – gekennzeichnet durch alle Farben des Regenbogens.

Diesem periodischen Verhalten liegt eine Symmetrie zu Grunde. Die j-Funktion ist symmetrisch bezüglich der unendlichen Modulgruppe, die ihrerseits aus Abbildungen der komplexen Ebene auf sich selbst besteht. Das heißt, dass die j-Funktion von deren Aktivitäten unbeeindruckt bleibt: Wenn ein Element der Modulgruppe aus der komplexen Zahl z die Zahl z' macht, dann ist $j(z) = j(z')$; die j-Funktion hat in beiden Punkten z und z' also den gleichen Wert.

FREDRIK JONANSSON / FREDRIK JONANSSON



Durch die Modulsymmetrie ist die j-Funktion insbesondere translationsinvariant, das heißt, ihr Muster wiederholt sich in waagerechter Richtung in einem Abstand von eins: $j(z) = j(z + 1)$. Außerdem ist sie symmetrisch bezüglich Spiegelungen von z am Einheitskreis: $j(z) = j(1/z)$.

ebenso bei anderen periodischen Funktionen möglich («Fourier-Entwicklung»). Jeder Vorfaktor einer solchen Reihe entspricht in der Musik der Lautstärke des jeweiligen Obertons. McKay hatte das Monster so sorgfältig studiert, dass er sofort die ersten drei Vorfaktoren 1, 196884 und 21493760 der Modulfunktion wiedererkannte: 1, 196883 und 21296876 sind die ersten drei niedrigsten Darstellungen der Monstergruppe. Summiert man sie geeignet auf, entsprechen sie den charakteristischen Zahlen der j-Funktion.

Anders als einige Kollegen, denen er seinen Fund vorstellte, glaubte McKay nicht an einen Zufall: Die Zahlenfolge, die beide augenscheinlich unterschiedliche Konstrukte verbindet, musste aus einem tieferen Zusammenhang zwischen ihnen herrühren.

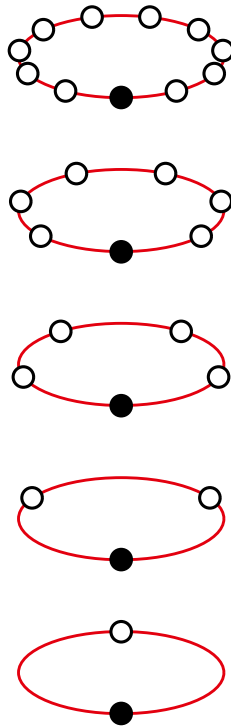
Erst 1992 gelang es Borcherds, diesen Zusammenhang zu finden und so die Mondschein-Verbindung zwischen dem Monster und der j-Funktion zu beweisen. Dafür erhielt er sechs Jahre später die Fields-Medaille, eine der höchsten mathematischen Auszeichnungen. In seiner

Endliche einfache Gruppen

Bis auf 26 Ausnahmen lassen sich die endlichen einfachen Gruppen in drei Klassen einteilen: die zyklischen und alternierenden Gruppen sowie die Gruppen vom Lie-Typ. Die 26 Einzelgänger bilden die sporadischen Gruppen, über die sich Mathematiker lange Zeit den Kopf zerbrachen.

Zyklische Gruppen

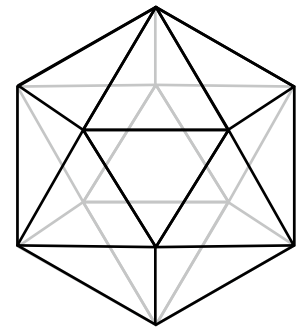
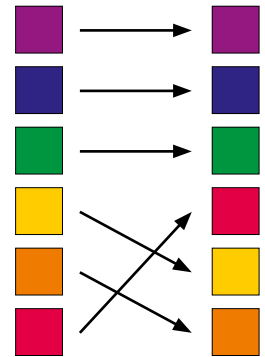
sind die einfachsten einfachen Gruppen. Ihre Elemente setzen sich aus einer einzelnen Transformation (rechts als Punkt gekennzeichnet) zusammen, die mehrmals angewendet werden kann. Ist die Anzahl ihrer Elemente eine Primzahl, so ist eine zyklische Gruppe einfach. Die Rotationen des gleichseitigen Dreiecks (siehe »Gruppentheorie für Einsteiger«, S. 72) sind ein Beispiel für eine einfache zyklische Gruppe mit drei Elementen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

Alternierende Gruppen

stammen von den möglichen Permutationen einer Menge mit n Elementen ab. Jede Vertauschung von Objekten kann durch die mehrmalige Permutation von zwei einzelnen Elementen abgeleitet werden, den so genannten Transpositionen. Die alternierenden Gruppen enthalten nur die Vertauschungen, die aus einer geraden Anzahl von Transpositionen bestehen. Die alternierende Gruppe von fünf Objekten entspricht der Symmetriegruppe des Ikosaeders (rechts unten). Rechts oben ist ein Element der alternierenden Gruppe von sechs Objekten abgebildet.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Arbeit enthüllte er neben den beiden Hauptakteuren einen dritten: die bosonische Stringtheorie, die beide mathematischen Objekte enthält und sie miteinander verflucht.

Die Stringtheorie versucht, die vier Grundkräfte der Natur zu vereinen. Darin sind die elementarsten Teilchen nicht punktförmig, sondern ergeben sich aus eindimensionalen so genannten Strings. Diese schwingen ähnlich wie die Saite eines Instruments und erzeugen so die bekannten Teilchen und Wechselwirkungen, wie etwa ein Elektron und ein Photon.

Eine physikalische Theorie als dritter Mitspieler

Die Strings können wie ein Faden geöffnet sein, aber auch einen geschlossenen Kreis bilden. Bewegt sich ein geschlossener String durch die Raumzeit, hinterlässt er eine schlauchförmige, zweidimensionale Spur. Der Schlauch eines Strings ist immer modulsymmetrisch, trotz der unterschiedlichen möglichen Schwingungen.

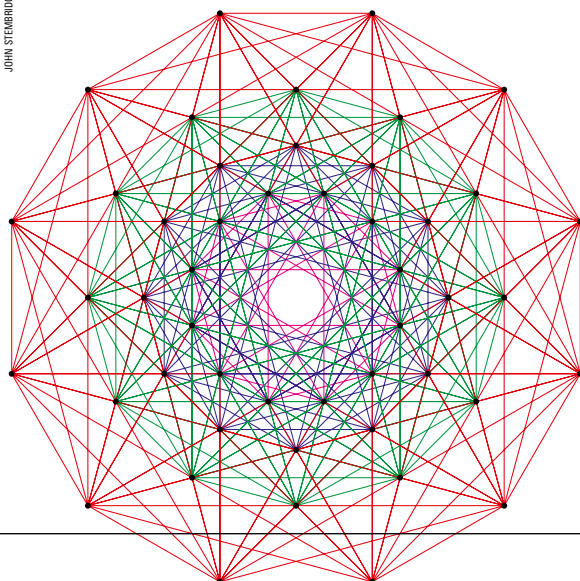
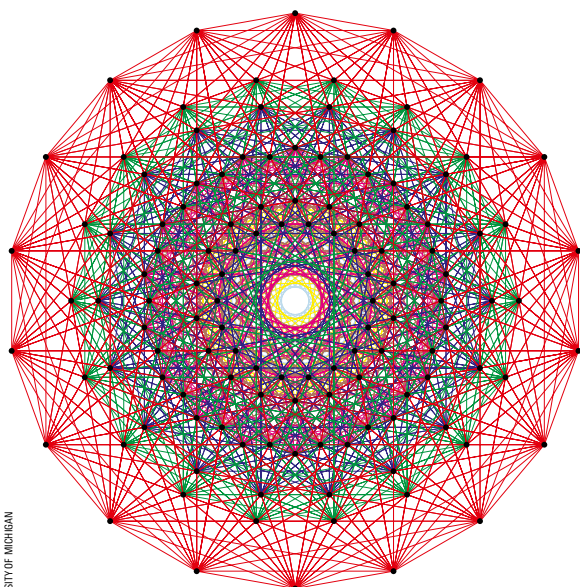
Borcherds gelang der Durchbruch, als er eine monster-symmetrische Stringtheorie fand und so die Modulsymmetrie der String-Schläuche mit dem Monster paarte. Die von ihm untersuchte – aber mittlerweile aus physikalischer Sicht überholte – bosonische Stringtheorie erfordert, dass

die Welt 25 Raumdimensionen hat. Um dieses Problem zu lösen, nehmen Stringtheoretiker an, dass die 22 überschüssigen Dimensionen »kompaktifiziert« sind: Sie seien so klein aufgerollt, dass wir sie in unserem Alltag nicht wahrnehmen.

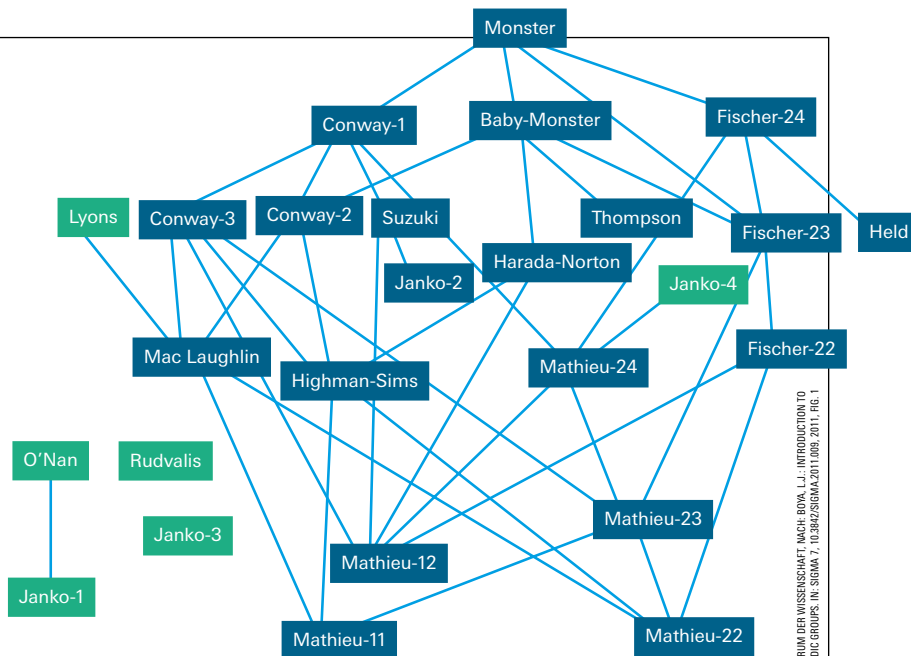
Die Raumdimensionen können in beliebiger Weise aufgerollt sein, etwa als Kugel oder als donutförmiger Torus. Allerdings hängt die Physik von dieser genauen Form ab: Eine Stringtheorie, in der die Dimensionen als Zylinder aufgerollt sind, liefert beispielsweise andere Vorhersagen als eine, bei der sie eine Kugel formen. Um die Teilchen und ihre Wechselwirkungen passend zu unserer Welt zu beschreiben, müssen Physiker in ihren Berechnungen die richtige Kompaktifizierung finden.

Anders als seine Vorgänger rollte Borcherds 24 statt 22 Raumdimensionen auf und stieß so auf eine monster-symmetrische Stringtheorie. Dass dabei nur eine freie Raumdimension übrig blieb, störte ihn nicht weiter – immerhin war er an den mathematischen Eigenschaften interessiert und nicht an einer physikalischen Theorie, die unsere Welt beschreibt. Borcherds kompaktifizierte die Raumdimensionen zu einem 24-dimensionalen Torus. In einem solchen hochdimensionalen Donut ist jede einzelne

Gruppen vom Lie-Typ sind die reichhaltigsten endlichen einfachen Gruppen. Sie stehen in enger Beziehung zu den in der Physik häufig auftretenden Lie-Gruppen. Deren einfachster Vertreter enthält alle Drehungen im dreidimensionalen Raum um den Ursprung. Betrachtet man statt des unendlich ausgedehnten dreidimensionalen Raums eine Menge mit bloß endlich vielen Elementen, ergeben sich die Gruppen vom Lie-Typ. Einige dieser Gruppen können als Symmetriegruppen von hochdimensionalen Polytopen gesehen werden. Die zweidimensionalen Projektionen zweier solcher Polytope sind unten abgebildet.



JOHN STEENBRIDGE, UNIVERSITY OF MICHIGAN



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: BOVA, L.J.: INTRODUCTION TO SPORADIC GROUPS. IN: SIAMIA 7, 1036/25/2004/2011/08/2, PG. 1

Die 26 übrig gebliebenen sporadischen Gruppen hängen teilweise zusammen: 19 von ihnen sind Untergruppen des Monsters. Die sechs grün markierten Außenseiter sind die Parias.

Raumdimension zu einem Kreis aufgerollt: Wandert man in eine Richtung geradeaus los, landet man stets wieder am Ausgangspunkt.

Die geschlossenen Strings schwingen entlang des 24-dimensionalen Donuts. Wie genau sie das bei einer bestimmten Energie tun, definiert den Zustand der Strings. Physiker sammeln alle möglichen Zustände in einem abstrakten Raum. Jeder Punkt darin entspricht einem bestimmten String-Zustand. Wie andere mathematische Objekte auch kann ein Zustandsraum symmetrisch sein – in Borcherss besonderem Fall sogar monstersymmetrisch.

Physikalisch gesehen zählen die Dimensionen der Monsterdarstellungen alle Möglichkeiten, mit denen ein String bei einer bestimmten Energie vibrieren kann. Bei niedrigster Energie schwingt er also nur auf eine Art, bei der nächsthöheren Energie gibt es bereits 196 883 verschiedene Möglichkeiten.

Borchers hatte somit bewiesen, dass die *j*-Funktion über eine versteckte Symmetrie verfügt, die mit dem Monster zusammenhängt. Außerdem hatte er den ersten konkreten Anwendungsbereich einer sporadischen Gruppe gefunden.

Allerdings glaubten viele Mathematiker, der monströse Mondschein sei ein Einzelfall und könne nicht auf andere sporadische Gruppen übertragen werden. 2010 bemerkte der Physiker Tohru Eguchi von der Universität Kyoto zusammen mit zwei Kollegen jedoch eine weitere Verbindung zwischen einer sporadischen Gruppe – der so genannten Mathieu-24-Gruppe – und einer differenzierbaren Funktion. Diese Funktion ist nur fast modulsymmetrisch

und heißt darum Mock-Modulform, was so viel wie Pseudo-Modulform bedeutet. Unter den Symmetrietransformationen verändert sich ihr Funktionswert um einen bestimmten Faktor (bei echten Modulformen ist dieser Faktor immer eins).

Um seinen Verdacht zu erhärten, untersuchte Eguchi die moderneren neundimensionalen Superstringtheorien. Wieder müssen Physiker die überzähligen sechs Dimensionen kompaktifizieren, und zwar auf sehr komplizierte Art, um möglichst realistische Modelle zu erzeugen: Statt zu einer Kugel oder einem Zylinder rollt man die Dimensionen zu einer seltsamen Klasse von Flächen auf, den so genannten K3-Flächen. Nur so könnte die Superstringtheorie irgendwann die physikalischen Gesetze unserer Welt reproduzieren. Allerdings verstehen bisher selbst Mathematiker diese geometrischen Objekte kaum.

Zu jeder K3-Fläche gehört eine eigene Superstringtheorie. Die jeweiligen Modelle sind derart komplex, dass Forscher – anders als bei bosonischen Stringtheorien – die genauen Stringzustände bisher nicht bestimmen konnten. Trotzdem lassen sich ihre allgemeinen Eigenschaften untersuchen: So berechnete Eguchi beispielsweise die Schwingungen der Strings, die in jeder K3-Oberfläche möglich sind. Der Physiker bemerkte, dass die Anzahl der möglichen Schwingungen den Dimensionen der Mathieu-24-Darstellungen entspricht. Summierte er diese charakteristischen Zahlen, ergaben sie die Vorfaktoren einer Mock-Modulform.

Dutzende neue Brücken könnten zu einer einheitlichen Theorie führen

Eguchi hatte damit bewiesen, dass der monströse Mondschein kein mathematischer Ausrutscher war. Dennoch unterscheidet sich sein Fund von Borcherss Arbeit: Die K3-Superstringtheorien sind nicht Mathieu-24-symmetrisch. Es bleibt schleierhaft, ob so eine Theorie überhaupt existiert und welche Rolle diese endliche Gruppe in der Physik spielt.

Bereits zwei Jahre später erkannte die Physikerin Miranda Cheng mit ihren Kollegen, dass sich Eguchis Arbeit verallgemeinern ließ: Darauf aufbauend bewiesen sie 22 weitere Mondschein-Verbindungen. Doch genau wie Eguchi untersuchten sie keine explizite Theorie, sondern betrachteten allgemeine K3-Stringtheorien und fanden so die Übereinstimmungen zwischen endlichen Gruppen und Mock-Modulformen. Die Forscher vermuten, dass K3-Flächen Symmetrien besitzen, die mit den Gruppen der jeweiligen Mondschein-Verbindungen zusammenhängen. Bisher konnten sie das aber nicht beweisen. Die mysteriösen geometrischen Gebilde sind vielleicht symmetrischer als bisher angenommen.

Die Mondschein-Verbindung für endliche Gruppen ist also kein Einzelfall, sondern scheint vielmehr die Regel zu sein – zumindest für die einfachen Untergruppen des Monsters. Unter all den Mondschein-Verbindungen blieben die Pariahs weiterhin außen vor. Viele Mathematiker fragten sich, ob sie wirklich isolierte Einzelgänger sind oder ob auch sie mit Modulformen zusammenhängen.

Ende September 2017 haben Ken Ono von der Emory University in Atlanta, Michael Mertens von der Universität zu Köln und Onos Kollege John Duncan gezeigt, dass es tatsächlich eine Modulform gibt, die zu einem Pariah gehört. Es handelt sich um die O’Nan-Gruppe, die mit $5 \cdot 10^{11}$ Elementen wesentlich kleiner als das Monster ist. Die niedrigste Darstellung der Gruppe ist 10944-dimensional und damit auch das kleinste O’Nan-symmetrische Objekt.

Die Geschichte dieser Entdeckung gleicht der von McKays unglaublichem Fund der 1970er Jahre: Die Forscher erkannten die charakteristische Zahlenfolge einer Funktion wieder und assoziierten sie mit der Paria-Gruppe. »Für mich war das definitiv eine Überraschung«, gibt Michael Mertens zu. »Überhaupt einen Mondschein selbst zu finden und die Modulformen zu konstruieren, war schon aufregend, aber die Tatsache, dass wir damit auch noch etwas über eine Paria-Gruppe sagen konnten, war wirklich unglaublich. Paria-Gruppen sieht man nämlich eigentlich nie in freier Wildbahn.«

Im Gegensatz zu den anderen Mondschein-Verbindungen hat der Fund der drei Forscher weder etwas mit Eguchis Arbeit noch mit der Monstergruppe zu tun. Bisher fanden die Forscher keinen Bezug zu einer Stringtheorie. »Da die Paria-Gruppen ›in der Natur‹ so gut wie nicht auftreten, spielten sie auch in den bisherigen Überlegungen von Stringtheoretikern keine oder nur eine sehr untergeordnete Rolle. Unsere Arbeit hat zumindest einige Forscher in diesem Bereich auf diese Frage aufmerksam gemacht, also darf man gespannt sein«, ergänzt Mertens.

Einer der führenden Experten auf dem Gebiet der Mondschein-Verbindungen, Terry Gannon, schreibt dazu in »Nature«: »Ken Ono und seine Kollegen haben ein Tor geöffnet. Ob es nun zu einem kleinen Raum führt oder einem Haus oder ob es uns eine ganze Welt eröffnet, können wir noch nicht beurteilen. Die Ergebnisse waren allerdings sehr unerwartet und revolutionieren das Bild, das wir von den Pariahs hatten.«

Der Paria-Mondschein ermöglichte es den Forschern, offene Fragen anderer mathematischer Gebiete zu beantworten. Da Modulformen eng mit der Zahlentheorie zusammenhängen, führte die versteckte Paria-Symmetrie der Modulform zu neuen Erkenntnissen in diesem Bereich. Aktuell versuchen Wissenschaftler, die Ergebnisse von Ono, Mertens und Duncan weiter auszubauen. Einige Physiker wagen es, davon zu träumen, dass dabei eine Theorie zu Tage tritt, die zum besseren Verständnis unseres Universums führen wird. ◀

QUELLEN

Gannon, T.: A Pariah Finds a Home. In: Nature 550, S. 191–192, 2017

Klarreich, E.: Moonshine Link Discovered for Pariah Symmetries. In: Quantamagazine 2017, <https://www.quantamagazine.org/moonshine-link-discovered-for-pariah-symmetries-20170922/>

Kachru, S.: Elementary Introduction to Moonshine. In: arXiv: 1605.00697, 2016

Ono, K. et al.: Pariah Moonshine. In: Nature Communications 8, 670, 2017

Niemals stillstehen.

Die Zielstrebigkeit des Satya Nadella im FOCUS.

WIRTSCHAFT



DIGITAL



24 Minuten mit Mr. Microsoft

Als **Satya Nadella** im Februar 2014 Chef von Microsoft wurde, drohte der ehemals mächtigste Konzern der digitalen Revolution in die Irrelevanz abzudriften. Vier Jahre und einen 250-Milliarden-Dollar-Turnaround später trafen wir ihn zum FOCUS-Gespräch

VON JÖRG HARLAN ROHLEDER

Foto: Fred Beck für FOCUS Magazine

FOCUS 5/2018

FOCUS 05/2018

Menschen im



DIGITALE GEISTES- WISSENSCHAFTEN AUF ZEITREISE DURCH DAS ALTE VENEDIG

Tausende von Karten und Manuskripten aus dem goldenen Zeitalter Venedigs werden derzeit mit Hilfe künstlicher Intelligenz digitalisiert. So wird dieser Schatz aus 1000 Jahren Geschichte Forschern erstmals zugänglich.





LINKS: GETTY IMAGES / DE AGOSTINI PICTURE LIBRARY / A. D'AGLIUCCI / G. MALETTI / UNIC C. B. ONIAROLI - BILLERFORTHING
IN PIAZZA SAN MARCO; RECHTS: ZETTER / GETTY IMAGES / ISTOCK BEARBEITUNG NIK SPENCER / A. D'AGLIUCCI

Das Projekt »Zeitmaschine Venedig« soll Historikern neue Möglichkeiten bieten, frühere Phasen der Lagunenstadt zu erkunden. Das Bild zeigt den Markusplatz im 18. Jahrhundert (links) und heute (rechts).



Alison Abbott berichtet als Korrespondentin der Zeitschrift »Nature« über Trends in der europäischen Forschung. Die promovierte Pharmakologin lebt in München.

» [spektrum.de/artikel/1555492](https://www.spektrum.de/artikel/1555492)

Unweit der von Touristen bevölkerten Piazzas lockt die Kirche Santa Maria Gloriosa dei Frari, kurz Frarikirche, Freunde der sakralen Kunst und Historiker. Denn in den beiden zugehörigen Franziskanerklostern füllen Karten, Monografien, Manuskripte und andere Aufzeichnungen aus dem goldenen Zeitalter der Republik Venedig insgesamt 80 Kilometer Regalbretter. Der Informatiker Frédéric Kaplan, Leiter des Digital Humanities Laboratory der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne (EPFL), will sie nicht nur digitalisieren, um Wissenschaftlern gezielte Recherchen zu ermöglichen, sondern dabei sogar neues Wissen generieren.

Sein Team bedient sich nicht nur modernster Scanner und Algorithmen, um die überwiegend auf Latein oder in venezianischem Dialekt verfassten Schriften in Texte umzuwandeln, die sich per Computer etwa nach Stichworten durchsuchen lassen. Die Forscher setzen auch auf maschinelles Lernen, also auf Techniken, die große Datensätze selbstständig nach Mustern und Gesetzmäßigkeiten durchforsten. Diese »Zeitmaschine Venedig«, wie die beteiligten Experten das Projekt nennen, weckt das Interesse von Epidemiologen und Wirtschaftsforschern, die sich aus den Daten zehntausender Bürger Hinweise über die Verbreitung von Krankheiten beziehungsweise zur Entwicklung von Märkten erhoffen.

Venedig blickt auf 1500 Jahre Geschichte zurück. Ge gründet im 5. Jahrhundert n. Chr., als römische Bürger in den Wirren der Völkerwanderung in die unzugänglichen Lagunen flüchteten, avancierte die Stadt zum wichtigsten

Handelsposten zwischen Westeuropa und dem Orient. Einerseits gut geschützt gegen ihre Feinde, andererseits mit einem leichten Zugang zum Adriatischen Meer gesegnet, wurde »La Serenissima Repubblica di San Marco«, die allerdurchlauchtteste Republik des Heiligen Markus, zur Seemacht, die weite Bereiche des Mittelmeers beherrschte.

Diese Position beruhte nicht zuletzt auf einer umfassenden Informationspolitik. Venedigs Verwaltungsbeamte wussten nicht nur, wer wo im Staat wohnte. Sie kannten auch Details über jedes Boot im Hafen und jede Veränderung, die an Gebäuden oder Kanälen vorgenommen wurde. Dass ihre Dokumente die Jahrhunderte überdauerten, verdankt sich der Stabilität dieser Republik. Während die Monarchen Europas Eroberungskriege führten, galt das Augenmerk der Führungselite Venedigs der Sicherung des Fernhandels, vor allem durch geschicktes Paktieren und enge Geschäftsbeziehungen mit den Mächtigen der Zeit. In vielerlei Hinsicht war es eine Modelldemokratie: Das Volk wählte den so genannten Dogen, den verschiedene, meist ebenfalls gewählte Räte unterstützten.

Künstliche Intelligenz analysiert den Klatsch der Diplomaten

Venedigs Stern sank, als die Levante als Hauptquelle kostbarer Importwaren an Bedeutung verlor, während Europas Kolonien in Übersee lieferten, was die Kundschaft beehrte. Im 18. Jahrhundert war die Lagunenstadt daher nur noch eine lokale Macht unter vielen. Als Napoleon Bonaparte mit dem Haus Habsburg um die Vorherrschaft in Italien rang, entschied sie sich gegen die Franzosen – und besiegelte damit ihr Schicksal. Am 16. Mai 1797 standen zum ersten Mal in der Geschichte der Stadt feindliche Truppen auf dem Markusplatz. Doch die französische Herrschaft währte nicht lange: 1815 wurde Napoleon besiegt und Venedig dem österreichischen Kaiserreich zugesprochen. Im gleichen Jahr richtete man das Staatsarchiv in der Frarikirche ein.

Im Lauf der folgenden Jahrzehnte gelangten alle staatlichen Verwaltungsdokumente inklusive der Sterberegister dorthin, ebenso Krankenberichte, notarielle Urkunden, Landkarten und Baupläne, Patentregister und so fort, manches zudem aus anderen italienischen Städten. Von besonderer Bedeutung sind die diplomatischen Berichte. »Venedigs Botschafter waren sehr aufmerksame Reisende, die ein geschultes Auge für die Waren in fremden Häfen hatten, aber auch die Persönlichkeit ihres Gegenübers erfassten«, erklärt Lorraine Daston, Direktorin am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin. »Ihre Berichte bergen eine Fülle von Informationen über Klatsch und Intrigen an den Herrscherhöfen.« Die wenigsten dieser Dokumente haben Historiker jemals gelesen. Nun werden sie systematisch in die »Zeitmaschine Venedig« eingespeist, ergänzt von unkonventionellen Informationsquellen wie Gemälden und Reise-Logbüchern.

Die Anwendung künstlicher Intelligenz in den Humanwissenschaften, insbesondere in der Linguistik, bildet einen Forschungsschwerpunkt Frédéric Kaplans. So entwickelte er einen Algorithmus, der in Zeitungsberichten der

AUF EINEN BLICK DATA MINING IN DER KLOSTERKIRCHE

- 1** Abertausende Dokumente aus 1000 Jahren Geschichte der Stadt Venedig bilden einen noch kaum erschlossenen Schatz an Informationen über den Alltag in der Lagunenstadt.
- 2** Diese Daten sollen nun Historikern, Epidemiologen und Ökonomen zugänglich gemacht werden: mit Hochleistungsscannern digitalisiert und mittels Algorithmen des maschinellen Lernens verarbeitet.
- 3** Indem die Forscher des Projekts »Zeitmaschine Venedig« zudem Karten und Gemälde berücksichtigen, rekonstruieren sie auch soziale Netzwerke bis über die Grenzen der Stadt hinaus.

letzten Jahrhunderte nach Wort- und Satzmustern sucht, um auf dieser Datengrundlage die Entwicklung der Sprache modellhaft nachzuvollziehen. Als sich die Rektoren der EPFL und der Università Ca' Foscari di Venezia zur Zusammenarbeit bei der Aufarbeitung des Archivs entschlossen, bot Kaplan sofort an, ein Konzept für Venedig zu erarbeiten. Er erinnert sich noch lebhaft daran, wie er 2012 das erste Mal die Räume betrat. »Die Zeit schien stillzustehen in dem Labyrinth aus mehr als 300 Sälen, die weder klimatisiert noch beheizt waren. Fragile Dokumente stapelten sich bis hinauf zur Decke, und gelegentlich rieselten gelbe Papierbrösel zu Boden.«

Ein solches Projekt erfordert freilich mehr als Informatiker. Historiker müssen die digitalisierten Manuskripte kommentieren und den notwendigen Kontext für die Datenverarbeitung liefern. Zum Beispiel ist es wichtig zu wissen, welche Funktionen die in einem Vertrag genannten Personen innehatten oder wie verlässlich eine Information ist. Daher wurde Isabella di Lenardo, Kunsthistorikerin und Expertin für digitale Stadtgeschichte, Kodirektorin der Zeitmaschine. Venedigs Staatsarchivare steuern ihre Kenntnisse über große Dokumentensammlungen bei. Dank dieser interdisziplinären Kooperation gelang es beispielsweise, ein Büchlein aus dem 16. Jahrhundert aufzuspüren, das den Verschlüsselungskode für einige Diplomatenberichte enthielt. Di Lenardos Mitarbeiter sind nun eifrig dabei, chiffrierte Botschaften zu dekodieren.

Schon vor der Zeitmaschine hatten die Staatsarchive ein Digitalisierungsprojekt begonnen, das vom italienischen Ministerium für kulturelles Erbe finanziert wurde. 2006 nahm ein speziell entwickelter Scanner seine Arbeit auf und digitalisierte mehr als 3000 Karten von italienischen Städten – darunter etliche, die Napoleon in Auftrag gegeben hatte. Diese Katasterkarten zeigen Grundstücksgrenzen und dokumentieren den Besitz von kleinen Landparzellen. Der Scanner hat gewaltige Ausmaße, denn einige Vorlagen sind vier mal sieben Meter groß.

Hochgeschwindigkeitsscanner beschleunigen nun die Arbeit. So können zwei einander gegenüberstehende Mitarbeiter bei einem Exemplar mit einer zwei Meter breiten, sich in der Waagrechten drehenden Scanplatte schnell hintereinander DIN-A3-Dokumente auflegen. Digitalisieren als Fließbandarbeit – angesichts der Menge an Dokumenten wird das gern in Kauf genommen. Eine andere Maschine erhielt einen Roboterarm, der Buchseiten automatisch umschlägt. Diese Geräte bilden eine Art Pipeline, die mehrere tausend hoch aufgelöste Scans pro Stunde produziert und Terabytes von Daten in Server speist. Bits und Bytes fließen auch nach Lausanne, wo Hochleistungscomputer sie in digitalen Text umwandeln.

Das überfordert jede noch so gute Standardsoftware, denn die vermag zwar gedruckte Buchstaben auszumachen und zu identifizieren, nicht jedoch handgeschriebene. Deren Gestalt variiert nicht nur von Schreiber zu Schreiber erheblich, sondern blieb auch bei ein und demselben im Lauf seines Lebens selten gleich. Eine EU-Kooperation mit dem Namen Recognition and Enrichment of Archival Documents (READ) entwickelt verschiedene Ansätze zur

MIT FROL. GEN. VON HILLARY SANCTUARY / EPFL / ARCHIVIO DE STATO



Die Staatsarchive von Venedig besitzen Dokumente aus einem Zeitraum von 1000 Jahren. Diese füllen 80 Kilometer Regalbretter.

Problemlösung. Kaplan, ein Mitglied dieser Kooperation, verwendet derzeit bevorzugt maschinelles Lernen zum Erkennen ganzer Wortgebilde.

Dieses Verfahren greift auf Algorithmen zurück, die ihre Regeln anhand von Erfahrungen anpassen können, um die Treffsicherheit zu erhöhen. Die Algorithmen der Zeitmaschine analysieren die Struktur des geschriebenen Textes und extrahieren daraus grafische Formen, die Ähnlichkeiten aufweisen; anschließend stellen sie eine Verbindung zwischen ihnen her. Das ermöglicht dem Nutzer beispielsweise, einen Namen in einem Dokument zu finden und dann das System zu befragen, wo er in anderen Manuskripten der Datenbank auftaucht.

Innerhalb der nächsten zehn Jahre sollen diese Scanner mit einem Gerät ergänzt werden, das selbst geschlossene Bücher lesen soll: mittels Computertomografie (CT), wie sie in der medizinischen Diagnostik angewandt wird. Dort errechnen Computer aus Röntgendaten, die aus verschiedenen Winkeln aufgenommen wurden, ein dreidimensionales Bild vom Körperinneren. Wissenschaftler der EPFL erforschen die Zusammensetzung von alten Tinten, um Moleküle zu identifizieren, die als Röntgenkontrastmittel dienen könnten. Auf dieser Grundlage wollen sie fragile Bücher und hunderttausende versiegelte Testamente zugänglich machen, ohne ihnen Schaden zuzufügen.

Noch beruhen die Kenntnisse über die Vergangenheit Venedigs vor allem auf den Überlieferungen der Führungselite, doch die Zeitmaschine wird mit alltäglichen Aufzeichnungen über die einfache Bevölkerung gefüllt sein. Das dürfte Historikern die Möglichkeit geben, das Leben von Ladenbesitzern, Boten und Händlern zu rekonstruieren, ohne die all die geschichtlichen Ereignisse nicht möglich gewesen wären.

Eine Katasterkarte, die Napoleon 1808 in Auftrag gegeben hatte, half beispielsweise, die Daten einer Volkszählung von 1740 in einen geografischen Kontext zu stellen. Dieser Zensus listete alle Bürger auf, die eine Immobilie in der Stadt besaßen oder mieteten. Die

Forscher haben zudem Gemälde ausgewertet und so einen animierten Rundgang durch Venedig geschaffen, der zeigt, welche Geschäfte in jedem Gebäude zur jeweiligen Zeit existierten.

Andere Animationen behandeln die Entwicklung des Rialto-Viertels ab dem Jahr 950, illustrieren, wie sich die Gebäude inklusive der Rialto-Brücke aus den Salzwiesen erhoben, wie dieses Areal immer wieder durch Brände zerstört und später wieder aufgebaut wurde und welche Gebäude welchen Familienunternehmen gehörten. Alle Simulationen werden mit jedem neu erfassten Dokument gegebenenfalls an die neuen Daten angepasst.

Die Zeitmaschine ergündet auch die sozialen Netzwerke in der Stadt sowie die zwischen Venezianern und anderen Europäern. Denn die Forscher nehmen an, dass es zwischen Menschen, die in einem Dokument genannt sind, eine Verbindung gab. Deshalb erscheint jede Person als Knoten in einem Beziehungsnetz. Wenn dieselben Personen in anderen Dokumenten auftauchen, erweitert es sich. Das liefert ein weiteres Werkzeug, um zu verstehen, wie die venezianische Gesellschaft funktionierte.

Lorraine Daston glaubt, dass die Zeitmaschine dazu beitragen kann, etliche Fragen zu beantworten. So mag sie zeigen, wie sich die Sprache entwickelte, um jene fremden Tierrassen zu beschreiben, die aus neu entdeckten Ländern importiert wurden. Oder sie könnte die Bewegungslinien von Gelehrten und Wissenschaftlern, die quer durch Europa reisten, zurückverfolgen.

Ihre persönliche Leidenschaft ist ein Phänomen, das die Entwicklung von Wissenschaft erst ermöglicht hat:



ZETTER / GETTY IMAGES / ISTOCK

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Das Video »Eine virtuelle Zeitmaschine für Venedig« finden Sie unter <https://youtu.be/uQQGgYPRWfs>

das Messen. »Im 17. Jahrhundert war man bereits emsig bestrebt, die Welt gründlich zu vermessen, doch im 15. und 16. Jahrhundert wurden die dafür benötigten Maßeinheiten kaum erwähnt. Wie also haben sie sich entwickelt? Die Stichwortsuche in Dokumenten aus mehreren Jahrhunderten könnte helfen, diese Frage zu beantworten.«

Diesen Enthusiasmus teilt der Wirtschaftshistoriker Joan Rosés von der London School of Economics and Political Science. Der Bestand von notariellen Daten aus einer Stadt, die für die Wirtschaftsgeschichte so bedeutend war wie Venedig, könne »dazu beitragen, das Verständnis über die Funktion der Finanzmärkte zu verändern«. Ein Großteil der Wirtschaftstheorien beruhe auf Annahmen, nicht auf konkreten Daten. Denn passende historische Informationen etwa über Transaktionen und Geldbewegungen seien Mangelware. Moderne Datensätze, auch die von Banken, hätten leider nur einen be-

grenzten Wert, da sie bereits auf Basis einer Wirtschaftstheorie verarbeitet seien, die von der jeweiligen Institution verfolgt wird. Historische Datensätze seien deshalb wertvoll, weil sie einfach nur aufzeichneten, wer was für wie viel verkaufte. Aber Europas große Finanzarchive von Europa sind nicht online verfügbar. »Wenn ich beispielsweise zum Notararchiv von Katalonien in Barcelona fahre, kann ich dort maximal drei Dokumente am Tag lesen; die Zeitmaschine Venedig mit ihren Recherchertools erreicht eine ganz andere Dimension.« Außerdem könne man nun viel von Menschen lernen, die wirtschaftlich gescheitert sind, während sonst nur erfolgreiche Personen Gegenstand der Forschung werden, da nur sie in die Geschichte eingegangen sind.

Venedigs Zeitmaschine ist der Prototyp für Amsterdam und Paris

Der Epidemiologe Marcel Salathé von der EPFL sucht in den Daten nach den Namen Verstorbener und findet oft Details über die Umstände ihres Todes. »Es ist vergleichbar mit einer einfachen elektronischen Gesundheitsakte«, sagt er. Die Pest rottete um die Mitte des 17. Jahrhunderts ein Drittel der venezianischen Bevölkerung aus. Salathé möchte nun mehr über die Ausbreitung der Krankheit erfahren. Epidemien ereignen sich auch heutzutage noch in der Welt, aber die Übertragungswege sind oft nur lückenhaft bekannt.

Kaplan hofft, dass Venedig nur ein Ausgangspunkt sein wird. Das Projekt hat sich mit Partnern um eines der nächsten Vorzeigeprogramme beworben, die von der Europäischen Union mit Milliarden Euro finanziert werden. Falls die Bewerbung Erfolg hat, sollen Zeitmaschinen in Städten mit gleichermaßen bedeutenden Archiven entstehen und miteinander vernetzt werden. Anfang 2017 nahm ein Konsortium von niederländischen Forschern die Zeitmaschine Amsterdam in Betrieb. Die Koordinatorin Julia Noordegraaf von der Universität Amsterdam sieht darin »eine großartige Chance, die kulturellen Beziehungen zwischen Amsterdam und Venedig während ihres goldenen Zeitalters im 17. Jahrhundert zu erforschen«. Eine Zeitmaschine für Paris ist schon im Gespräch.

Einige Wissenschaftler betrachten die Ambitionen jedoch auch skeptisch, nicht zuletzt, weil sich viele Kerntechnologien noch in der Entwicklungsphase befinden. »Die Vision einer umfassenden digitalen Darstellung der Geschichte über verschiedene Zeitfenster hinweg ist großartig, aber es wäre vielleicht besser, sie in vielen kleinen Projekten zu entwickeln«, meint Jürgen Renn, ein Pionier der digitalen Geisteswissenschaften und Direktor am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte. Seine Kollegin Daston ist dennoch davon überzeugt, dass mit der Zeitmaschine eine neue Ära der Geschichtsforschung beginnt. »Wir Historiker sind mit dem Staub der Archive aufgewachsen, die Zukunft könnte jedoch anders aussehen.«

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 546, S. 341–344, 15. Juni 2017

1918

DIE URSACHE DER SEEKRANKHEIT

»Durch die Schwankungen des Schiffes werden auch die Eingeweide mit ihrem meist flüssigen Inhalt in Bewegung versetzt. Dadurch entstehen Dehnungen und Zerrungen in den Befestigungen und infolgedessen Störungen in den nervösen Organen. Hieraus erklären sich Übelkeit und Erbrechen. Auch das Schwindelgefühl läßt sich aus dem entstehenden Druck des Gehirns an der Schädelswand erklären, ferner durch die entstehende Blutleere. Durch das Hinabsinken des Körpers wird dem Blut eine Eigenbewegung nach unten mitgeteilt, wodurch die oberen Körperteile blutleer werden.« *Prometheus 1491, S. 316*

FETTGEWINNUNG AUS MAIKÄFERN

»Der Leiter des Kriegsausschusses für Fette und Öle sprach die Worte: »Jedes Gramm Fett muß gewonnen werden, bevor unser gutes Geld zum Einkauf ins Ausland geht.« Im Maimonat bevölkert viele Wipfel und Winkel unseres Vaterlandes der Maikäfer, der schon als Futter- oder Düngemittel verwendet wurde. Nach übereinstimmenden Analysen getrockneter Maikäfer ist der Gehalt an verdaulichem Eiweiß 30,4 % und an Fett 10,5 %. Dieses Fett enthält 8,2 % Cholesterin und 15,53 % Lecithin. Die Gewinnung ist eine einfache. Es gilt nur, die gefangenen Käfer auszukochen und die angesammelte Fettschicht abzuschöpfen. Mit diesem Fette wurde einen ganzen Winter lang eine Lampe gespeist. Der Rückstand kann, da durch die Siedehitze der Schmarotzer des Käfers, der Riesenkrätzer, sicher abgetötet wurde, gefahrlos an Schweine verfüttert werden.« *Kosmos 5, S. 125*

1968



Der kleine, helle Fleck markiert das Scheitelauge.

DAS DRITTE AUGE DES GRASFROSCHS

»Wir finden [auf dem Kopf des Grasfroschs] einen kleinen, etwas helleren Fleck, hinter dem sich ein kleines Geheimnis verbirgt: das dritte Auge. Anders als die beiden Seitenaugen, die Linsen besitzen, vermittelt das Scheitelauge nur Lichteindrücke und keine scharfen optischen Bilder. Es ist kürzlich gelungen, die von diesem Auge ausgehenden Impulse elektrisch zu messen und so seine Funktion zu prüfen. Die allgemeine Lichtempfindlichkeit des Stirnorgans entspricht derjenigen der beiden Seitenaugen. Die vom »dritten Auge« zum Mittelhirn gelenkten Impulse steuern über den Hormonhaushalt die Aktivität des Tieres, vom Winterschlaf angefangen bis zum Farbwechsel der Haut.« *Kosmos 5, S.215*

QUARANTÄNE FÜR MONDREISENDE

»Mit einem Kostenaufwand von \$ 8100000 wird in Houston ein Empfangslaboratorium für Mondreisende fertiggestellt. Die Astronauten werden dort unter strenger Quarantäne gehalten. Als Schutz gegen Mond-Viren und -Bakterien dürfen die Astronauten die Apollo-Kapsel erst dann öffnen, wenn ein Kunststoffunnel damit verbunden ist, das zu einem hermetisch abgeschlossenen, 11 m langen Spezialraum führt. Wenn das Trägerschiff einen amerikanischen Hafen erreicht, wird der gesamte Raum zum Weltraumzentrum in Houston geflogen. Erst dann dürfen die Weltraumreisenden durch ein weiteres Kunststoffunnel das Empfangslaboratorium betreten.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 5, S. 211*

ERSTE KONTAKTE ZU UNERFORSCHTEN INDIANERN

»Im äußersten Nordwesten Venezuelas lebt ein bisher unerforschter Indianerstamm, die Mutilones, die sich Bari nennen. Erst in den letzten Jahren gelang es der Eingeborenenkommission in Zusammenarbeit mit der Kapuzinermission, friedliche Kontakte aufzunehmen. Dazu wurden zunächst von Helikoptern aus Geschenke abgeworfen. Schließlich besuchte ein Kapuziner auf dem Landweg eine Gruppe. Damit besteht nun erstmals die Möglichkeit, diesen interessanten Stamm, den man auf 200 Individuen schätzt, ohne Gefahr wissenschaftlich zu untersuchen.«

Die Umschau 10, S. 319 (Seit dem Erstkontakt 1950 hat sich das Territorium des Stamms unter anderem durch Ölförderung auf sieben Prozent der ursprünglichen Fläche verringert. D. Red.)

ANTHROPOLOGIE

DIE WIEGE DER GÖTTER

Im Nordwesten des Amazonasbeckens befindet sich die größte Fundstätte prähistorischer Felsmalereien Amerikas. Entstand dort die Götterwelt der späteren Hochkulturen Mittel- und Südamerikas?



Jörg Denzer hat über die Konquista Amerikas promoviert und arbeitet als Fernsehjournalist mit Schwerpunkt Wissenschaft in München. Die Malereien am Chiribiquete konnte er bei einer Expedition in Begleitung von Fernando Urbina Rangel mit eigenen Augen bewundern.

► spektrum.de/artikel/1555494

► Carlos Castaño Uribe befand sich mitten über dem Amazonasgebiet, als sein Pilot wegen eines Unwetters die vorgesehene Route ändern musste. Völlig unerwartet tauchte vor seinen Augen aus dem Regenwald ein bisher unbekanntes Tafelgebirge auf. Gebannt ließ er die Maschine Runde um Runde über den Bergen kreisen. Schon kurze Zeit später erklärte Castaño Uribe, damals Chef der kolumbianischen Nationalparkverwaltung, das Gebiet zum »Chiribiquete-Nationalpark«. Das war 1989. Ein Jahr später kehrte er an der Spitze einer interdisziplinären Forschungsexpedition zurück – mit Helikoptern, denn auf dem Landweg sind die Berge praktisch nicht zu erreichen. Während die Biologen sich an endemischen Tierarten begeisterten und die Geologen die bizarr geformten, 1,6 Milliarden Jahre alten Felsen studierten, entdeckte Castaño Uribe die größte Fundstelle an prähistorischen Felsmalereien Amerikas.

Womöglich handelt es sich sogar um die größte der Welt. Denn bis jetzt konnte der Archäologe, heute wissenschaftlicher Leiter der Stiftung Herencia Ambiental Caribe, nur einen kleinen Teil des mehr als 200 Kilometer langen und 50 Kilometer breiten Gebirges begehen. Er fand damals und bei späteren Expeditionen Hunderttausende von Felszeichnungen, verteilt auf Dutzende Felswände. Die mit Ocker gemalten Bilder sind zwischen einem Zentimeter und anderthalb Metern groß. Sie zeigen Menschen, viele davon mit Speerschleudern, einer eher ungewöhnlichen Waffe für Bewohner von dichtem Regenwald. Daneben finden sich Tiere, anthropomorphe Wesen, rätselhafte Symbole und geometrische Muster. Das am häufigsten abgebildete Tier ist der Jaguar.

Castaño Uribe entdeckte auch zahlreiche Symbole und Wesen, die wir heutzutage als Kunstwerke in den südamerikanischen Museen bewundern oder aus den Kodizes der



JÖRG DENZER

Maya kennen: zum Beispiel den anthropomorphen »Jaguararmann«, den »Stabgott« Wiraqucha oder die »Gefiederte Schlange« alias Quetzalcoatl, die Schöpfungsgottheit der Tolteken, Maya und Mexika, Letztere besser bekannt unter der Bezeichnung Azteken.

Wann diese Kunstwerke entstanden, lässt sich leider nicht ohne Weiteres ermitteln. Das Alter der Ockerfarbe an den Felswänden selbst kann nicht bestimmt werden. Doch mit Hilfe der Radiokohlenstoffmethode datierte Castaño Uribe Holzkohlereste aus insgesamt 50 Feuerstellen, die wahrscheinlich von den Schöpfern der Felsmalereien

genutzt wurden. Darauf deuten Tierknochen, Samen essbarer Früchte sowie Ockerstückchen und mit Ocker gefärbte Steinfragmente hin, die die Forscher in den Feuerstellen fanden. Während die jüngste vor etwa 500 Jahren brannte, also etwa zu der Zeit, als die ersten Europäer in die Gegend kamen, datierte die älteste auf erstaunliche 19500 Jahre. Damals sollten aber nach Meinung der meisten Forscher noch gar keine Menschen in Südamerika gelebt haben. Ist die Bestimmung falsch? Gut möglich, denn die Radiokohlenstoffmethode gilt noch immer als hochkomplex und fehleranfällig. Allerdings

Tief im kolumbianischen Regenwald entdeckten Forscher wie Fernando Urbina Rangel (rechts) dutzende Felswände, die wohl über Jahrtausende hinweg mit Malereien versehen wurden.





Hielten die Maler hier ihre ersten Kontakte mit den Eindringlingen aus Europa fest? Die dargestellte Szene erinnert an einen Bericht der Konquistadoren, die mit ihren Kriegshunden Angst und Schrecken unter den Einheimischen verbreiteten. Ganz oben zerstückeln die bulligen Tiere einen oder mehrere Menschen, in der Bildmitte werden sie von den Indianern mit Gaben besänftigt.

JÖRG DENZER

ermittelten Archäologen für Fundstellen in Chile und Brasilien sogar ein noch höheres Alter. Auch diese Datierungen sind umstritten. Doch womöglich gelangte der Mensch tatsächlich viel früher auf den amerikanischen Doppelkontinent als bislang angenommen. Die Malereien am Chiribiquete könnten zu Kronzeugen dieser frühen Wanderung werden.

Wie sich die Schöpfer der Bilder selbst nannten, weiß niemand. Trotz des gewaltigen Zeitraums von mehreren tausend Jahren bleiben die abgebildeten Motive im Wesentlichen die gleichen. Lediglich der Stil ändert sich von der ältesten zur jüngsten Phase. Das Verbreitungsgebiet der namenlosen Kultur, die Castaño Uribe nüchtern »Tradicón Cultural Chiribiquete« nennt, ging weit über das Areal

des heutigen Nationalparks hinaus. Seine Südgrenze bilden die felsigen Ufer des Río Caquetá, der in den Anden entspringt und später in den Amazonas mündet. Hier stießen die Forscher auf Steingravuren. Bis zu 5000 davon zählten sie bereits. Im Norden befindet sich der große Fundort »La Lindosa«, ein niedriger Gebirgsstock, der wie der Chiribiquete geologisch zu den Ausläufern des Berglands von Guayana gehört. Zuletzt wurden dort im Frühjahr 2017 neue Felszeichnungen entdeckt. Und die Suche nach weiteren Fundstätten ist noch lange nicht abgeschlossen.

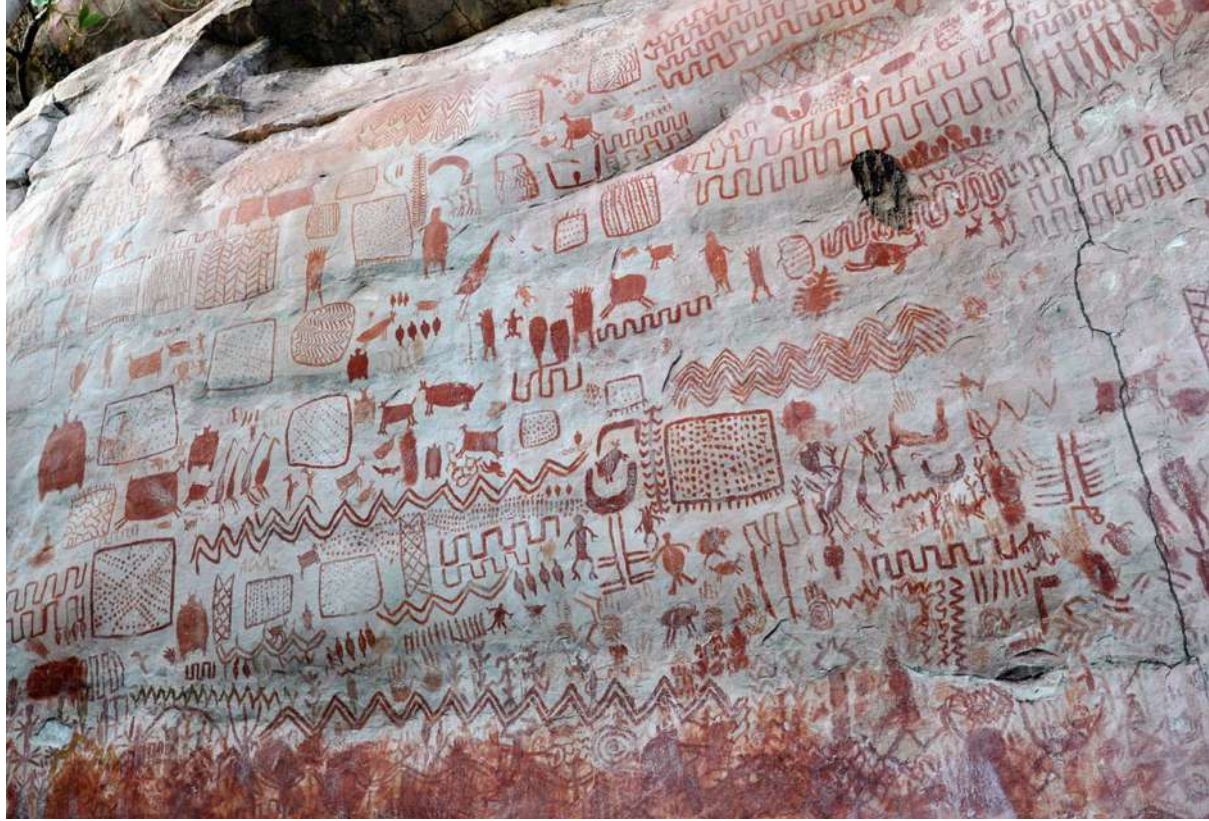
Ein Mythos der am Río Caquetá lebenden Uitoto-Indianer untermauert die frühe Datierung. Laut dieser Erzählung entstanden die Gravuren zu einer Zeit, in der »der Sonnengott alle Bäume verbrannte, so dass überall nur Gras wuchs.« Es ist eine Beschreibung der Vegetationsform, die im Amazonasbecken während und nach dem letzten eiszeitlichen Maximum, also vor gut 20 000 Jahren, vorherrschte. Damals war das Amazonasbecken in weiten Teilen kein Regenwald, sondern eine grasbewachsene Savanne.

Heute ist nicht nur der Chiribiquete eine menschenleere Region, auch am Mittellauf des Río Caquetá leben auf einer Länge von mehreren hundert Kilometern nicht mehr als 3000 Menschen meist indianischer Abstammung. Wie sah es dort in vorspanischer Zeit aus? Dicke und ausge dehnte Schichten von künstlicher Schwarzerde, so genannter »terra preta«, in der Nähe des Flusses legen nahe, dass die frühen Bewohner der Gegend intensiv Landwirtschaft betrieben. Dies wiederum deutet auf eine hohe Bevölkerungszahl hin, vielleicht gab es sogar urbane Zentren. Von »Städten« sprechen jedenfalls die Primärquellen, die Berichte der ersten Konquistadoren, die um 1540 in den Nordwesten Amazoniens gelangten. Auch von einem besonders kriegerischen Stamm ist die Rede, dessen Waffen die Europäer erwähnenswert finden: Es sind Speerschleudern, wie wir sie in den Malereien finden.

AUF EINEN BLICK KULTUR OHNE NAMEN

- 1** Das kaum zugängliche Chiribiquete-Tafelgebirge im kolumbianischen Regenwald beherbergt eine einzigartige Kostbarkeit: Per Zufall fanden Archäologen hier hunderttausende Felszeichnungen prähistorischer Indianer.
- 2** Die ersten Bilder könnten bereits kurz nach Ankunft des Menschen in Südamerika entstanden sein. Die jüngsten sind nur wenige hundert Jahre alt. Dabei hat sich der Stil der Malereien kaum verändert.
- 3** Wer genau die Felsbilder schuf, bleibt ungewiss. Rätselhaft ist, dass viele Motive die Bilderwelt späterer Hochkulturen vorwegzunehmen scheinen. Bildete das markante Tafelgebirge einst ein religiöses Zentrum?

Über die Bedeutung vieler Symbole können die Forscher nur rätseln. Doch einige scheinen die Bilderwelten späterer Hochkulturen vorwegzunehmen. Das Chiribiquete-Gebirge könnte eine Art südamerikanisches Zentralheiligtum gewesen sein.



JÖRG DENZER

Haben sich Angehörige dieser Volksgruppe, die man heute Karijona nennt, an den Felswänden verewigt? Nach Berichten von Missionaren des 18. Jahrhunderts lebten tatsächlich Karijona auf den Tafelbergen und benutzten solche Waffen.

Wo der Schöpfergott Wiraqucha die Erde betrat

Auch der Anthropologe Fernando Urbina Rangel von der Universidad Nacional de Colombia in Bogotá erforscht die Felsbilder am Río Caquetá und bei La Lindosa. Dort hat er jetzt Malereien entdeckt, die das erste gewalttätige Zusammentreffen der Indios mit den Konquistadoren wiedergeben könnten (siehe Bild links oben). Sie zeigen im ersten Bild, wie ungewöhnliche Wesen – Urbina Rangel interpretiert sie als Kriegshunde, die die Spanier mit sich führten – eine Gruppe Indianer bedrohen. Im zweiten Bild liegen diese zerstückelt vor den Hunden. Ein drittes Bild macht vor, wie man der neuen Bedrohung begegnet: Man ergibt sich und hält für die (Herren der) Hunde große Mengen Nahrung bereit. Dieses Vorgehen wird in den Berichten der Konquistadoren bestätigt. Die Eroberer waren bei ihren Expeditionen auf die Nahrungsvorräte der Indios angewiesen. Einer schreibt, man habe einige Indianer »vor den anderen Indios von den Hunden zerreißen lassen«, um Angst und Schrecken zu verbreiten.

Der interessanteste Aspekt ist vielleicht die Wirkung der abgebildeten Motive auf spätere Kulturen in Süd- und Mittelamerika. Am Río Caquetá hat Urbina Rangel Abbildungen gefunden, die sich offenbar auf den Schöpfungsmythos der »serpiente ancestral« beziehen, der Urschlange, aus der die ersten Menschen entstanden. Es ist der Schöpfungsmythos vieler indianischer Gesellschaften am Amazonas und in Mittelamerika. Auch einen Einfluss auf eine der ersten Hochkulturen in den Anden erkennt Urbina

Rangel: Die beeindruckenden Steinskulpturen der San-Agustín-Kultur (3300 v. Chr.–1500 n. Chr.) gehen wohl auf die Steingravuren vom Río Caquetá zurück und stehen in Bezug zur Mythenwelt der Uitoto.

Haben die Schöpfer der Malereien noch andernorts Spuren hinterlassen? Castaño Uribe weist darauf hin, dass die im Chiribiquete abgebildeten Motive die Götterwelt späterer Hochkulturen vorwegnehmen. Selbst die außergewöhnliche Topografie des Gebirges spiegele sich in goldenen Kunstwerken zur Verehrung des Sonnengottes wider: die Nord-Süd-Ausrichtung des Gebirges, seine »Teilung« durch die Äquatorlinie und eine geologische Besonderheit, vier gewaltige kreisrunde Karsteinbrüche in den Tafelbergen. Er glaubt, das Gebirge könne von den präkolumbischen Völkern für den mythischen Ort gehalten worden sein, an dem der Schöpfer- und Sonnengott Wiraqucha die Erde betreten hat. Weil die »Tradición Cultural Chiribiquete« bis zur Ankunft der Spanier fortbestand, könnten die Berge bis dahin ein wichtiges religiöses Zentrum gewesen sein, eine Art Jerusalem der amerikanischen Religionen. War es vielleicht die legendäre »Casa del Sol«, das »Haus der Sonne«, eines jener fantastischen Ziele, das die spanischen Konquistadoren suchten?

Die Erforschung dieses beeindruckenden Komplexes steht ganz am Anfang, lädt zu faszinierenden Hypothesen ein – und verspricht viele Überraschungen. Seit Kurzem weiß man, dass im Gebirge Gruppen von Indianern leben, die keinen Kontakt zur Zivilisation haben. Urbina Rangel und Castaño Uribe vermuten, dass es die letzten Nachfahren der sonst ausgestorbenen Karijona sind. Sie wurden beobachtet, wie sie Felswände mit Bildern bemalten. ◀

QUELLE

www.rupestreweb.info/chiribiquete2.html

Umfassende Beschreibung der Malereien vom Chiribiquete (spanisch)

REZENSIONEN



Der Iguanodon war ein Pflanzenfresser und ein Herdentier, das sich von Farnpflanzen ernährte. Er hatte einen scharfen Daumendorn, mit dem er sich verteidigen konnte.

In dieser Gegend war eine riesige Raubsaurier gewohnt, die Iguanodons frass.

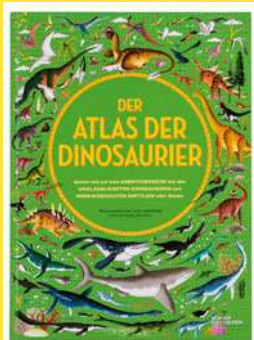
Der Baryonyx hielt sich meist im Wasser auf, suchte aber vielleicht auch an Land nach anderer Nahrung.

Mit seinen kräftigen Armen und großen Klauen konnte der Baryonyx Beutetiere gut festhalten.

Dieser Fischfräßer hatte angeordnete Zähne – ein Merkmal, das auch bei heutigen Fischen vorkommt.

Der Schädel des Baryonyx hatte die gleiche Form wie ein Krokodilschädel. Mit seinem langen Maul konnte er Fische aus dem Wasser fangen. Unter- und Oberkiefer waren etwas versetzt, sodass sich ein gefangener Fisch nicht so leicht freizappeln konnte.

Der Baryonyx wurde 1983 in einer Lehmgrube in England entdeckt.



Lucy Letherland, Emily Hawkins
DER ATLAS DER DINOSAURIER
Komm mit auf eine Abenteuerreise mit den unglaublichsten Dinosauriern und merkwürdigsten Reptilien aller Zeiten
Kleine Gestalten, Berlin 2018
88 S., € 29,90

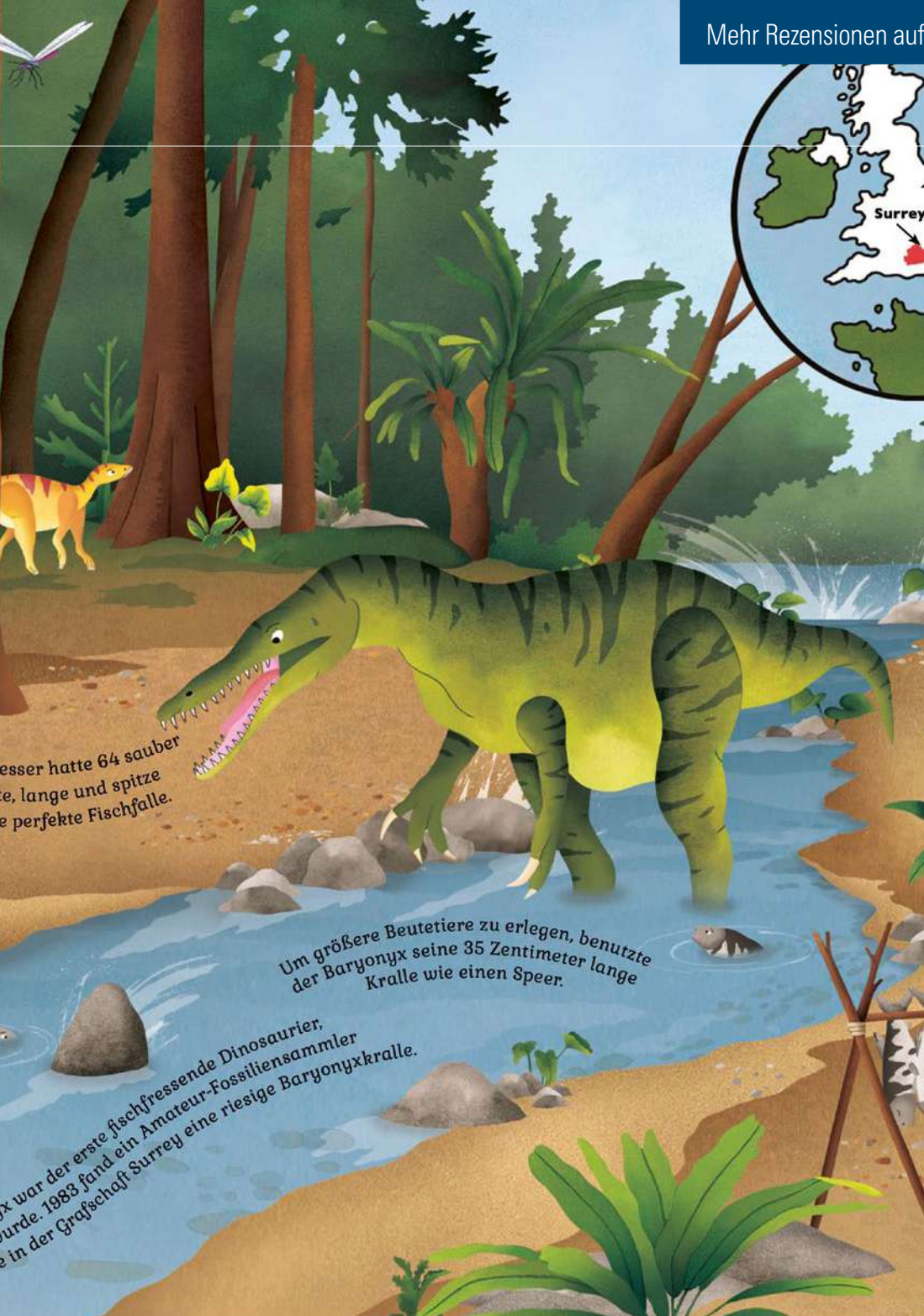
KINDERBUCH **DINOS UND IHRE ZEITGENOSSEN**

Ein buntes Wimmelbuch nimmt Kinder mit auf eine Reise durch Trias, Jura und Kreidezeit.

► Lange vor der Zeit der Menschen war die Welt bevölkert von Lebewesen, die uns heute im Rückblick überaus faszinieren: Dinosaurier. Dieser Atlas richtet sich an junge Dinofans ab sechs Jahren. In farbenfrohen Zeichnungen stellt er 31 Spezies vor, die im Erd-

mittelalter (Mesozoikum) gelebt haben, also in dem Abschnitt zwischen 252 und 66 Millionen Jahren vor heute. Sie gehören aber, anders als der Titel vermuten lässt, keineswegs alle zu den Dinosauriern. Vertreten sind neben den verwandten Ptero- und Plesiosauriern auch eine Schild-

LUCY LETHERLAND, EMILY HAWKINS: DER ATLAS DER DINOSAURIER. MIT ILLUSTRATIONEN VON KLEINE GESTALTEN, BERLIN



...esser hatte 64 saubere
...e, lange und spitze
...e perfekte Fischfalle.

Um größere Beutetiere zu erlegen, benutzte
der Baryonyx seine 35 Zentimeter lange
Kralle wie einen Speer.

...x war der erste fischfressende Dinosaurier,
... wurde. 1983 fand ein Amateur-Fossilensammler
... e in der Grafschaft Surrey eine riesige Baryonyxkralle.

Neben der eigentlich vorgestellten Art zeigen die Grafiken weitere Tiere, die zeitgleich lebten – darunter andere Saurier, aber auch Insekten, Fische, Vögel und Säugetiere. Das sorgt für eine lebendigere, umfassendere Darstellung. Allerdings kann man bei dem Detailreichtum leicht den Überblick verlieren, insbesondere, da sich manche Infotexte auf andere Arten beziehen. Teils lustig, teils etwas störend wirken vermenschlichende Elemente in den Bildern. So finden sich Dinos, die mit Ferngläsern nach Beute spähen oder zum Fressen eine Serviette umgebunden haben.

Der Schwerpunkt des Buchs liegt klar darauf, die Begeisterung für Saurier und ihre Zeitgenossen zu wecken und zu fördern. Das gelingt nicht nur dank der lebendigen Zeichnungen, sondern auch mittels jeder Menge erstaunlicher Fakten. So erfährt man, dass ein *Apatosaurus*-Baby, das beim Schlüpfen weniger als fünf Kilogramm wog, sein Gewicht im Lauf des Lebens um das 10 000-Fache steigerte. Auch lesen wir, dass *Microaptor* zwar nicht fliegen, aber bis zu 18 Meter weit gleiten konnte. Anschauliche Vergleiche helfen, sich Größe, Gewicht oder Geschwindigkeit der Tiere vorzustellen. Leider beantworten die Autorinnen nur selten die naheliegende Frage, woher man das eigentlich alles weiß. Doch sie erklären, wie Fossilien entstehen, was es mit der Plattentektonik auf sich hat und warum die Dinosaurier ausstarben.

Manches Kind, das seinen Lieblingsdino sucht,

kröte und ein Hai. Damit bietet das Buch einen weit gefassten Überblick über die Lebewesen des Mesozoikums.

Gegliedert ist der Atlas nicht zeitlich, sondern geografisch. Jedes Kapitel beginnt mit der doppelseitigen Übersichtskarte einer bestimmten Weltregion.

Darauf ist verzeichnet, wo erstmals Fossilien der im Folgenden porträtierten Tiere gefunden wurden. Drei kleine Weltkarten zeigen, wie der jeweilige Kontinent zur Trias, Jura- und Kreidezeit aussah. Auf den anschließenden Doppelseiten steht jeweils eine Art im Mittelpunkt. Ein

großformatiges, detailreiches Bild stellt eine rekonstruierte Szene aus deren Leben dar. Kurze, leicht verständliche Texte geben Einblicke etwa in die Nahrungssuche, Fortpflanzung oder das Verteidigungsverhalten der Spezies. Steckbriefe liefern ergänzende Informationen.

dürfte allerdings enttäuscht werden. Zwar kommen Stars wie *Tyrannosaurus rex* und *Triceratops* vor, ebenfalls beliebte Gattungen wie *Brachiosaurus* und *Iguanodon* aber werden nur am Rande erwähnt.

Die Rezensentin Elena Bernard ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.



Jörg Resag

FEYNMAN UND DIE PHYSIK

Leben und Forschung eines außergewöhnlichen Menschen
Springer, Berlin 2018
341 S., € 19,99

PHYSIK GENIALER PHYSIKER UND BONGOTROMMLER

Richard Feynman leistete entscheidende Beiträge zu relativistischen Theorien gequantelter Felder. Weithin bekannt sind die nach ihm benannten Diagramme.

► Nachdem zu Beginn des 20. Jahrhunderts der Umbruch der Physik durch die Quanten-

theorie vollzogen war, standen die Theoretiker vor der Aufgabe, sie mit der Relativitätstheorie zu vereinen. Wie Einsteins berühmte Formel $E = mc^2$ besagt, sind Masse und Energie austauschbar. Somit können Teilchenstöße mit ihrer Wucht neue Partikel erzeugen oder vorhandene vernichten, das heißt, in pure Strahlungsquanten verwandeln. Zur Beschreibung solcher Vorgänge braucht man eine relativistische Theorie gequantelter Felder.

Bei der Lösung dieser Aufgabe spielte der US-Amerikaner Richard Feynman (1918–1988) eine zentrale Rolle. Teilchenphysiker hantieren heute gewohnheitsmäßig mit Feynman-Diagrammen, um Näherungslösungen für komplexe Wechselwirkungen zu berechnen. Vor allem für die Quantenfeldtheorie des Elektromagnetismus leistete Feynman Pionierarbeit, die 1965 mit einem Nobelpreis ausgezeichnet wurde. Außerdem trug er zur Theorie der starken Wechselwirkung bei: Aus Feynmans hypothetischen »Partonen« wurden kurz darauf die Quarks seines jüngeren Kollegen Murray Gell-Mann (* 1929). Und die Theorie der schwachen Kraft faszinierte Feynman so sehr, dass er unabhängig von anderen die Paritätsverletzung – die Brechung der Spiegelsymmetrie – bei schwachen Zerfällen beschrieb. Obwohl er dabei nicht der Erste war, hielt er diese Entdeckung eines neuen Naturgesetzes für seine größte Leistung.

All dies und noch viel mehr erzählt Jörg Resag,

promovierter Physiker und populärwissenschaftlicher Autor, in seinem hervorragenden Buch über Feynmans Leben und Forschung. Resag gelingt die Engführung biografischer Details mit Darstellungen der physikalischen Zusammenhänge. So zeigt er überzeugend, wie Feynmans frühe Faszination vom Prinzip der kleinsten Wirkung ihn zur Methode der Pfadintegrale führte – um einen Quantenprozess zu berechnen, summiere man alle möglichen Übergänge vom Anfangs- zum Endzustand – und von dort weiter zum Formalismus der Feynman-Diagramme.

Dabei kommt Resag zugute, dass der Protagonist seiner Biografie ein äußerst ungewöhnlicher, interessanter und sympathischer Mensch war. Letzteres gilt zumindest aus einiger Entfernung. Für enge Kollegen wie Gell-Mann war Feynman, der Bongotrommler und rastlose Wirbelwind, anscheinend bei aller Wertschätzung aber auch eine ziemliche Nervensäge.

Ähnlich wie Einstein reagierte Feynman auf Autoritäten allergisch. Das nützte seiner wissenschaftlichen Originalität, trieb jedoch manchmal Vorgesetzte zur Verzweiflung. So leistete er sich in Los Alamos allerlei Schabernack, während er am hochgeheimen Manhattan-Projekt zur Entwicklung der Atombombe mitwirkte. Legendar wurde sein Beitrag zur Untersuchung der Challenger-Katastrophe, als er öffentlich demonstrierte, dass unterkühlte Dichtungsringe die Explosion der Raumfähre ausgelöst

hatten – und dass die NASA-Bürokraten entsprechende Warnungen der Ingenieure unterdrückt hatten.

Bei Vorträgen riss Feynman seine Hörer mit, darin sind sich alle einig, die ihn noch selbst erlebt haben oder die heute auf Youtube die zahlreichen Aufzeichnungen seiner Auftritte betrachten. Als schriftliches Dokument seines originalen Denkstils, der stets anschauliche Plausibilität auch bei schwierigsten Zusammenhängen anstrebte, besitzen wir die drei Bände der »Feynman Lectures on Physics«. Dieser wissenschaftliche Best- und Longseller sei allen empfohlen, die durch Resags schöne Biografie eines außergewöhnlichen Menschen auf den Geschmack gekommen sind.

Der Rezensent Michael Springer ist Physiker und freier Mitarbeiter bei **Spektrum** der Wissenschaft.

LEBENSSTANDARD GLÜCK STATT VERDIENST

Günstige Zufälle prägen den individuellen Erfolg weit mehr, als die meisten annehmen.

► Erfolgreiche Menschen sind oft talentiert und haben hart gearbeitet. Aber es gibt mindestens ebenso viele, die es nicht »nach oben« schaffen, obwohl sie die gleichen Fähigkeiten besitzen und sich ebenso stark bemühen. Denn der selbst geleistete Anteil am Lebenslauf wird meist deutlich überschätzt, die Rolle von Glück



Robert H. Frank
OHNE GLÜCK KEIN ERFOLG
 Der Zufall und der Mythos der
 Leistungsgesellschaft
 dtv, München 2018
 224 S., € 20,00

und Zufall hingegen stark unterbewertet. Das schreibt der amerikanische Ökonom Robert H. Frank, der als Professor für Wirtschaftswissenschaften an der Cornell University (New York) arbeitet und sich als Buchautor sowie »New York Times«-Kolumnist einen Namen gemacht hat.

Frank selbst hatte Glück im Unglück, als er beim Tennisspielen einen Herzanfall erlitt und nur überlebte, weil zufällig ein Krankenwagen in der Nähe war. In seinem Buch fragt er, welche Bedeutung zufällige Faktoren für den Lebenserfolg haben, etwa der Geburtsmonat oder der Anfangsbuchstabe des Nachnamens. So haben Studien gezeigt: Schulkinder, die wegen ihres Geburtsdatums zu den älteren in der Klasse zählen und aus diesem einfachen Grund deutlich öfter repräsentative Positionen bekleiden (beispielsweise als Klassen Sprecher), erzielen später im Berufsleben höhere

Gehälter. Eine weitere Untersuchung ergab, dass Assistenzprofessoren mit umso höherer Wahrscheinlichkeit eine Festanstellung bekamen, je früher ihr Nachname im Alphabet auftauchte – wohl deshalb, weil bei gemeinschaftlich verfassten Fachartikeln die Nachnamen der beteiligten Autoren oft alphabetisch sortiert sind. Erfolg, so Franks Fazit, hängt maßgeblich mit den Lebensumständen zusammen, ist also weitgehend dem Glück zu verdanken.

Der Autor zeigt das exemplarisch an bekannten Personen. Der US-Unternehmer Bill Gates etwa, der zweitreichste Mensch der Welt, kam durch eine glückliche Fügung an eine Schule, die ihren Schülern unbeschränkten Zugang zu einem der ersten Time-Sharing-Computerterminals bot. Danach gefragt, wie viele seiner Altersgenossen damals eine solche Möglichkeit gehabt hätten, meinte Gates: »Wenn es weltweit 50 waren, würde mich das sehr wundern. Ich hatte als Jugendlicher einen besseren Zugang zur Softwareentwicklung als wohl jeder andere zu dieser Zeit.«

Ein zweites Beispiel ist der US-Schauspieler Al Pacino. Er verdankt seine sagenhafte Karriere vor allem dem Umstand, dass er eine Hauptrolle in dem überaus erfolgreichen Film »Der Pate« bekam – eine höchst willkürliche und unwahrscheinliche Besetzung, denn Al Pacino war zu diesem Zeitpunkt kaum bekannt. Der damals noch unerfahrene Regisseur Francis Ford Coppola wollte für die Rolle jemanden, der

wie ein »echter Sizilianer« aussah, und wählte Al Pacino statt, wie es eigentlich üblich gewesen wäre und von den Studiobossen auch gefordert war, einen bekannteren Darsteller.

Mit fortschreitender Lektüre wird immer klarer: Erfolgreiche Menschen unterschätzen die Bedeutung günstiger Zufälle in ihrem Leben und messen der eigenen Leistung ein zu hohes Gewicht bei. Viele wollen auch nicht zugeben, wie viel Glück sie tatsächlich hatten. Das fängt schon beim Elternhaus, dem Land und dem sozialen Umfeld an, in das man hineingebohren wird. In einem hoch entwickelten, funktionierenden Staat aufzuwachsen, als Kind geliebt und umsorgt zu werden, von den Möglichkeiten einer Mittelschichtfamilie zu profitieren, die richtigen Kontakte vermittelt zu bekommen – all das sind entscheidende Anfangsvorteile, die die Weichen für das gesamte restliche Leben stellen. Viele Kinder, die sich in solchem Milieu entfalten, sind von Anfang an auf der Erfolgsspur, weitgehend unabhängig davon, über welche Fähigkeiten sie verfügen. Wer dieses Glück nicht hat, dem bringt Können wenig bis gar nichts.

Es sei ein weit verbreiteter Trugschluss, dass ein gelingendes Leben vor allem harter Arbeit und Intelligenz zu verdanken sei, schreibt Frank. Sein Sachbuch ist kurzweilig zu lesen, interessant und lehrreich.

Die Rezensentin Kristina Vonend ist Germanistin und Ethnologin und arbeitet als Pressereferentin in München.

ÖKOLOGIE MEHR ALS NUR STRAND

Zwei Biologen nehmen ihre Leser mit auf eine Entdeckungsreise in den einzigartigen Lebensraum der Küsten.

▶ Mit dem Biologen und renommierten Wissenschaftsautor Bruno P. Kremer und dem Meeresbiologen Fritz Gosselck hat sich ein erfahrenes Duo gefunden, um Leser(inne)n »Die Küste, Lebensraum zwischen Land und Meer«, nahezubringen. Das aus ihrer Zusammenarbeit entstandene Buch ist Bildband und Wissenschaftslektüre zugleich. Sein Coverbild spricht ziemlich klar für sich: Auch wenn es nicht explizit im Titel erwähnt wird, geht es vor allem um die Küsten von Nord- und Ostsee.

Das Grenzgebiet zwischen Land und Meer bietet Naturerlebnisse, die



Bruno P. Kremer,
 Fritz Gosselck
DIE KÜSTE
 Lebensraum zwischen
 Land und Meer
 Theiss, Stuttgart 2017
 192 S., € 39,95

immer wieder neu faszinieren. Besonders die Nordseeküsten überraschen mit ihrem wechselnden Erscheinungsbild. Selbst wer immer an ein und demselben Strand Urlaub mache, könne jedes Jahr, jede Saison und nicht selten auch zu jeder Tageszeit »Neuland« entdecken, schreiben die Autoren.

Nach einer einleitenden Betrachtung lenken Kremer und Gosselck den Blick auf Grundsätzliches: das Element Wasser sowie die Phänomene der Wellen und Gezeiten. Auf das letzte Thema gehen sie besonders ausführlich ein. Anhand von Zeichnungen behandeln sie sowohl physikalische als auch astronomische Aspekte, welche die regelmäßige Abfolge von Ebbe und Flut bedingen.

Es folgt ein Streifzug durch die verschiedenen Küstenformationen. Ob bei der Beschreibung von zerfurchten Felsen, Klippen, weitem Sandstrand und wilden Dünen, Gezeitentümpeln oder Salzwiesen – überall stehen erstklassige Farbfotos dem Text zur Seite. So möchten Kremer und Gosselck verständlich machen, wie die unterschiedlichen und teils extremen Lebensbedingungen ökologische Spezialisten hervorbringen. Die Leser lernen eine faszinierende Flora mit Algen, Flechten und Halophyten kennen, ebenso eine spannende Fauna von mikroskopisch kleinen Organismen über Krebse und Schnecken bis zu Wat- und anderen Wattvögeln.

Die Autoren wollen dazu anregen, die Facetten der Küsten bewusst wahrzunehmen. Und tatsächlich

wird im Verlauf des fast 200 Seiten starken Bands klar: Der »Rand vom Land« ist mitnichten eine scharfe, gleich bleibende Linie. So gehen Kremer und Gosselck im Kapitel über das Watt auf das Zusammenspiel von Gezeiten und Boden ein. Die Leser erfahren hier beispielsweise, dass die ostfriesische Insel Wangerooge sich in nur drei Jahrhunderten einmal um ihre komplette Länge nach Osten verschoben hat.

Die Lektüre beantwortet immer wieder ganz naheliegende Fragen: Woher stammt das Salz der Meere? Wie entstehen Wellen? Was hat es mit den vielen kleinen Löchern im Sand auf sich? Meist liefern die Autoren gut nachvollziehbare Erklärungen. Manchmal drücken sie sich aber auch sehr kompliziert aus. Abgesehen von dem gewöhnungsbedürftigen Umstand, dass der Textstil wiederholt zwischen wissenschaftlich und flapsig wechselt, wäre eine bessere Platzierung der Fotos wünschenswert. So erscheinen Text und zugehöriges Bild oft auf unterschiedlichen Seiten, so dass die Leser hin- und herblättern müssen. Zudem hätten die Autoren deutlicher darauf hinweisen sollen, dass die Küstenregionen durch wirtschaftliche Interessen und Umweltverschmutzung bedroht sind.

Trotz dieser kleineren Mängel lohnt sich die Lektüre unbedingt, weckt Begeisterung und macht Lust auf einen Urlaub im Norden.

Die Rezensentin Bettina Pabel ist promovierte Lebensmittelchemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Aschaffenburg.



MEDIZIN VERGESSENE KATASTROPHE

Womöglich mehr Opfer als beide Weltkriege zusammen forderte die Influenzapandemie von 1918. Dieses Buch rekonstruiert die Geschehnisse.

Die Spanische Grippe von 1918 ließ ein Drittel der Weltbevölkerung erkranken und forderte mit 50 bis 100 Millionen Toten womöglich mehr Opfer als beide Weltkriege des 20. Jahrhunderts zusammen. Warum wissen wir dennoch so wenig über diese demografische Katastrophe, eine der größten in der Geschichte der Menschheit? Das versucht die preisgekrönte Wissenschaftsjournalistin und Romanautorin Laura Spinney in diesem Werk zu beantworten. Sie stellt Menschen aus diversen Weltregionen vor und beschreibt an deren Schicksalen sehr anschaulich, wie sich die Grippe auf Gesell-

schaft, Politik und Kultur auswirkte und warum sie kollektiv weitgehend vergessen wurde. Die Autorin porträtiert Personen aus China, Indien und New York bis hin zum fernen Alaska und erläutert an deren Beispielen, wie verschiedene Länder und Kulturen mit den Folgen der Pandemie umgingen.

Spinney beleuchtet nicht nur die Geschehnisse um 1918, sondern auch, wie die Influenza in die Welt kam, welche Spuren sie bis heute hinterlassen hat und was wir aus ihr für die Zukunft lernen können. Die Pandemie 1918 verlief in drei Wellen, mit der tödlichsten im Herbst. Bei etlichen Infizierten verfärbte sich die Haut blauschwarz, und die Lungen liefen mit austretendem Blut voll, so dass die Patienten letztlich erstickten. Angesichts ratloser Ärzte deuteten viele die Krankheit als eine Strafe Gottes und suchten ihr Heil bei vermeintlich höheren Mächten. In Russland zelebrierten Menschen »schwarze Hochzeiten« auf Friedhöfen, in China versuchte man den »Teufel« mit Drachengöttern zu vertreiben. Vielerorts türmten sich unbestattete Leichen, da die Totengräber nicht mehr hinterherkamen. Der Rauch der Krematorien verdunkelte den Himmel. Nahrungsmangel und Plünderungen waren die Folge, in manchen Städten herrschten postapokalyptische Zustände.

Die Japaner bezeichneten die Krankheit als »Sumo-Grippe«, die Inuit nannten sie lediglich »die große Krankheit«, in anderen Ländern wurde sie nach Personen benannt. Es gibt

drei Thesen dazu, wo die Pandemie ihren Ursprung gehabt haben könnte: China, USA oder Frankreich. Jedenfalls begann sie trotz ihres Namens nicht in Spanien.

Das Buch zeigt auf, inwiefern die Grippe den Lauf der Geschichte verändert haben könnte. So ist der Autorin zufolge denkbar, dass die Influenza wegen der vielen geschwächten deutschen Soldaten das Ende des Ersten Weltkriegs einläutete. Sicher ist, dass die Pandemie ganze Familien auslöschte und mit all den Witwen und Waisen eine »verlorene Generation« hinterließ. Depression, Verzweiflung und Lethargie mündeten in kollektives Vergessen. So entschieden

sich die Indigenen in Alaska zum »nallunguarluku«, sinngemäß dazu, »so zu tun, als sei es nicht passiert«. Das in den zurückliegenden Jahren gestiegene Interesse von Wissenschaftlern, Kunsthistorikern und Romanautoren hat zur Folge, dass die »vergessene Pandemie« allmählich aus dem Schatten des Ersten Weltkriegs tritt.

Lange war es ein Mysterium, warum die Spanische Grippe so tödlich verlief. Mittlerweile, so Spinney, kann die Wissenschaft Antworten darauf liefern. Forscher sind nach Alaska gereist, um im Permafrost konservierten Grippeopfern Lungengewebe zu entnehmen. Wissenschaftler in Atlanta haben 2005 in einem Hochsicherheitslabor

das Virus von 1918 rekonstruiert. Solche Arbeiten liefern nicht nur aufschlussreiche Rückblicke, sondern helfen auch einzuschätzen, wann die nächste Pandemie kommen, wie schwer sie sein könnte und wie man sich optimal auf sie vorbereiten kann. In den kommenden 100 Jahren erwarten Experten mindestens vier Pandemien; bei wenigstens einer davon dürfte es sich um eine Influenza handeln.

Spinneys Werk stellt eine gelungene Mischung aus anekdotischen Schilderungen und detaillierten Hintergrundinformationen dar. Die Autorin verzichtet weitgehend auf Fachjargon und überzeugt mit gut nachvollziehbaren Ausführungen zur Genetik und

Biologie des Grippevirus. Zum positiven Gesamteindruck tragen auch die Schwarz-Weiß-Fotos am Beginn jedes Kapitels bei.

Der Autorin gelingt es, die Pandemie aus verschiedenen Blickwinkeln darzustellen und so die diversen historischen Schilderungen zu einem einheitlichen Bild zusammensetzen. Dabei umreißt sie die Geschichte der Grippe von der Antike bis heute. Teilweise geht allerdings wegen der dicht gedrängten Darstellung verschiedener Charaktere und Ereignisse die Stringenz verloren. Unterm Strich lässt sich das Werk dennoch allen Interessierten empfehlen.

Die Rezensentin Madeline Bucher ist Entwicklungs- und Molekularbiologin.

Spektrum PLUS+

DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

NEU!

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

- Download des Monats im Mai: **Spektrum** HIGHLIGHTS »Gene und Umwelt«
- Redaktionsbesuch bei Spektrum.de am 12. Juni 2018
- Leserexkursion zum Radioteleskop Effelsberg am 9. Juni 2018
- Ermäßigter Reisepreis für die Kurzreise nach Bern »Auf den Spuren von Albert Einstein«
- Veranstaltungen der neuen Reihe **Spektrum** LIVE zum Vorteilspreis

Weitere Informationen und Anmeldung!
Spektrum.de/plus

KEIN ICH-GEFÜHL

Kolumnist Michael Springer mochte nicht ausschließen, dass Maschinen Bewusstsein entwickeln können. (»Künstliche Gehirne«, *Spektrum* Februar 2018, S. 29)

Christian Bickel, Wiesbaden: Nach meiner Auffassung wird hier nicht hinreichend zwischen Intelligenz und Bewusstsein unterschieden. Das lässt sich an der Frage des Philosophen Thomas Nagel zeigen: »Wie ist es, eine Fledermaus zu sein?« Man kann ein Gehirn beliebig weit analysieren. Das lässt sich dann prinzipiell auch synthetisch nachbilden. Wie es sich anfühlt, ein Computer zu sein, wird auf diese Weise aber nicht geklärt. Michael Springer wird nicht beschreiben können, wie es ist, Michael Springer zu sein, so dass ein anderer es nachempfinden könnte. Dieser intrinsische Aspekt des Bewusstseins unterscheidet es von Intelligenz, die man nah an der menschlichen Intelligenz in Computern emulieren kann.

Werner Kinnebrock, Trechtingshausen: Die Turingmaschine ist ein Computermodell, das Alan Turing vor einigen Jahrzehnten entwickelte. Diese Maschine kann nichts anderes, als Daten aus einem Speicher lesen, vergleichen, addieren, subtrahieren und wieder abspeichern. Man kann beweisen, dass alle Arbeiten eines Computers auch von einer Turingmaschine erledigt werden können. Dabei kann allerdings eine Aktion, die ein Supercomputer in einer Millisekunde schafft, für die Turingmaschine Jahre oder Jahrzehnte dauern. Nun ist es aber kaum vorstellbar, dass eine Turingmaschine mit ihren simplen Aktionen Bewusstsein erzeugen kann. Also auch kein noch so moderner Computer.

MAXIMAL IRRATIONAL

Florian Freistetter befasste sich mit der Approximation irrationaler Zahlen durch Kettenbrüche. (»Der goldene Schnitt«, *Spektrum* Februar 2017, S. 41)

Roland Schröder, Celle: Welche irrationale Zahl ist die irrationalste? Eignet sich der Superlativ zur Beschreibung von Eigenschaften irrationaler Zahlen? Und warum ausgerechnet der goldene Schnitt? Fragen über Fragen, von denen Florian Freistetter keine beantwortet.

Antwort der Redaktion:

Wesentliche Teile der Antwort stehen in Florian Freistetters Artikel. Etwas ausführlicher: Jede irrationale Zahl lässt sich durch eine Folge rationaler Zahlen approximieren (so weit Schulwissen). Das kann mehr oder weniger geschickt geschehen; dabei sei unter »geschickt« eine Approximation verstanden, die bei möglichst kleinem Nenner einen möglichst kleinen Approximationsfehler hat. (Das ist noch keine präzise Definition.) Die geschick-

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.

teste Näherung ist die durch Kettenbrüche, genauer: reguläre Kettenbrüche, also solche, in denen alle Zähler gleich 1 sind. Manche irrationale Zahlen sind schwerer zu approximieren als andere, das heißt, der Approximationsfehler konvergiert langsamer gegen null. Am schwersten zu approximieren ist die Zahl des goldenen Schnitts, denn in dessen Kettenbruchentwicklung sind alle Nenner gleich 1, also so klein wie nur möglich, und deswegen trägt jedes neue Glied der Kettenbruchentwicklung nur minimal (»so wenig wie überhaupt möglich«) zur Näherung an die irrationale Zahl bei. In diesem Sinn ist die (geläufige) Redeweise von der Zahl des goldenen Schnitts als der irrationalsten aller Zahlen zu verstehen.

Das war eine umgangssprachliche Kurzfassung. Mathematisch sauber dargestellt findet sich die Sache zum Beispiel in dem Wikipedia-Artikel zum Stichwort »Kettenbruch«.

ELEKTROSTATISCHE EFFEKTE?

Wassertropfen, die über eine Wasseroberfläche gleiten, waren Physikdidaktiker H. Joachim Schlichting in seiner Rubrik einen genaueren Blick wert. (»Surfende Wassertropfen«, *Spektrum* Februar 2018, S. 60)

Lutz Dietrich, Fleischwangen: Vor rund 40 Jahren gab es in der Zeitschrift »Kosmos« einen ähnlichen Artikel. Die schwebenden Tropfen wurden durch seitliches Aufspritzen mit minimalem Winkel zur Wasseroberfläche eines Beckens erzeugt.

Untersuchungen mit einer gegenüber dem Wasserreservoir elektrisch aufgeladenen Rasierklinge schienen auf elektrostatische Effekte hinzuweisen – was den Schichten geordneter Wassermolekülen in dem aktuellen Artikel entsprechen würde, die dann als Dipole eine elek-

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



trostatische Abstoßung der beiden Oberflächen von Tropfen und Reservoir bewirken würden. Jedenfalls könnten durch den Feldeffekt der geladenen Rasierklinge die schwebenden Tropfen gezielt versenkt werden.

ERBGUT IST ALLES

Der Bakteriologe Zachary D. Blount ging der Frage nach, ob sich das Leben auf der Erde noch einmal genauso entfalten würde. (»Evolution zwischen Zufall und Wiederholung«, **Spektrum** März 2018, S. 38)

Martin Behr, Mörlenbach: Die beiden Formulierungen »die weitere Entwicklung fußte stets stark auch auf dem Gewesenen« und »weil stets außerdem die jeweilige Vergangenheit mitspielt« sind massive Untertreibungen. Die Erbanlagen eines Individuums bilden die einzige Grundlage, auf der Evolution stattfinden kann. Was nicht da ist, kann nicht mutieren. Alles andere, wie tatsächlich auftretende Mutationen, Gendrift, Selektion, Vererbung von Mutationen, die nicht der Selektion unterliegen, und Rekombination von Erbanlagen, geht nur vom vorhandenen Erbgut des jeweiligen Individuums aus.

Die Evolution der *Anolis* mit der gesamten Evolution zu vergleichen, ist eher eines Kreationisten würdig. Die genetischen Unterschiede zwischen diesen Arten sind gering (sie gehören alle der gleichen Gattung an!) und lassen deswegen auf einfache Weise die schnelle Entwicklung von Ähnlichkeiten zu – ein ganz spezieller Fall, wie er

in Inselpopulationen ohne Konkurrenz regelmäßig auftritt. Mutationen werden auch niemals »fallen gelassen«, wie es später heißt; das wäre ja ein aktives Tun des Lebewesens. Sie bleiben erhalten oder verschwinden auf Grund von Gendrift (also Zufall), aber nicht, weil sie keinen »Fitnessvorteil« bieten. Nicht einmal Mutationen, die einen Fitnessnachteil bringen, wie etwa Erbkrankheiten, verschwinden aus einem Genpool, solange dieser groß genug ist.

ERRATA

»Neue Elektroden für Lithium-Ionen-Akkus«, **Spektrum** März 2018, S. 22

In dem Beitrag wird die Akkukapazität von 370 Milliamperestunden fälschlich einer elektrischen Ladung von 1,3 Coulomb gleichgesetzt. Richtig ist, wie Reinhard Simons aus Horb bemerkte, der 1000-fache Wert: 1332 Coulomb.

»Wie entstand der Mond?«, **Spektrum** Februar 2018, S. 52

In der Bildunterschrift auf S. 52 steht, Harrison Schmitt sei der bislang letzte Mensch auf dem Mond gewesen. Richtig ist: Er war zwar der letzte, der dessen Oberfläche betreten hat. Doch der Kommandant der Apollo-17-Mission, Eugene Cernan, bestieg vor dem Rückflug zur Erde die Landefähre nach ihm. Wir danken unserem Leser Robert Küther aus Brno für den Hinweis.

Spektrum
der Wissenschaft

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M. A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff (Volontärin), Robert Gast, Dr. Tim Kalvelage, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Kordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

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

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Michaela Butler, Dr. Claudia Hecker, Dr. Ursula Loos, Dr. Michael Springer.

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

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

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 39 vom 1. 1. 2018.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachste-

henden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2018 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechthinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562,

Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek



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



futur III

Überall Parken GmbH

Es muss nicht die Welt kosten.

Eine Kurzgeschichte von James Anderson

Als Physikdoktorand an einer großen technischen Hochschule hatte ich eine Menge zu tun. Aber besonders viel Zeit verbrachte ich damit, einen Parkplatz zu finden. Ich war nicht wichtig genug, um einen reservierten Platz für Hochschulangehörige zu bekommen, und nicht reich genug, mir einen Dauerparkplatz leisten zu können.

Eines Tages hatte ich bei der Parkplatzsuche noch weniger Glück als sonst. Als ich die unzähligen Blocks zurück zu meinem Labor wanderte, fiel mir ein neuer Laden mit einem verführerisch klingenden Schild auf: »Überall Parken GmbH – moderate Gebühren.«

Hinter der Theke saß mein alter Freund Alfred. Vor einem Jahr hatte er unser Doktorandenprogramm verlassen, nach einem heftigen Wortwechsel mit seinem Betreuer.

Ich steckte den Kopf durch die Tür. »Hey, wie läuft's denn so, Al?«

»Ich bin in die Privatwirtschaft gegangen«, antwortete er. »Das ist mein neues Start-up.«

»Und du kannst wirklich ganz nahe bei der Uni billiges Parken anbieten?«

»Ja, da staunst du«, grinste er. »Unser Labor erforscht ja Quantencomputer. Und damit die zuverlässige Resultate liefern, brauchen sie Fehlerkorrekturen. Also habe ich mal untersucht, ob die Fehler eine Struktur haben. Und stell dir vor, so ist es. Wenn man die Fehler entschlüsselt, bilden sie eine Botschaft – eine Wer-

bebotschaft. Auf Deutsch. Sie lautet: »Brauchen Sie Geld? Werden Sie steinreich mit der Lösung des ewigen Parkplatzproblems! Kaufen Sie eine Konzession von Überall Parken GmbH. Nicht im freien Handel erhältlich.« Dann folgt die Bauanleitung für ein Gerät zur Kontaktaufnahme mit dem Anbieter. Als ich das meinem Betreuer erzählte, hielt er mich natürlich für übergeschnappt und warf mich hinaus.«

Er seufzte. »Ohne Aussicht auf eine akademische Karriere und ohne Einkommen tat ich das einzig Sinnvolle: Aus einem Kurzwellenradio von 1950 und einem Röhrenverstärker baute ich das Kontaktgerät zusammen. Offenbar sind Röhren dabei ganz entscheidend. Und voilà!« Er ließ die Arme kreisen.

»Die Parkplatztechnik beruht auf dem Vielweltenmodell der Quantenmechanik«, dozierte Al weiter. »Du parkst deinen Wagen in einem alternativen Universum. Deren Bewohner liefern dir die nötige Hard- und Software, um die Autos unterzubringen

»Die Parkplatztechnik beruht auf dem Vielweltenmodell der Quantenmechanik«, dozierte Alfred

und wiederzubeschaffen. Du fährst einfach den Wagen auf die Übertragungsrampe, drückst einen Knopf, und das Auto verschwindet. Drück einen anderen Knopf, und es kommt zurück.«

Ich war sprachlos. Al war erst seit einem Monat im Geschäft und schwamm bereits in Geld. Er hatte sogar schon den Parkplatz besichtigt. In einem Paralleluniversum!

»Wie wär's, wenn du einem alten Laborkumpel diesen Parkplatz zeigen würdest?« Immerhin musste das Verfahren auf irgendeiner radikal neuen Physik beruhen, da könnte ich vielleicht etwas Entscheidendes für mein Forschungsprojekt lernen.

»Warum nicht?« Al zuckte die Achseln und zeigte auf das nächstbeste Auto. Wir stiegen ein, und er drückte einen Knopf auf seiner Fernbedienung. Sofort befanden wir uns inmitten einer riesigen Fläche. Sie erstreckte sich in alle Richtungen und war säuberlich in rechteckige Felder unterteilt.

Darauf waren bereits unzählige Autos geparkt. Sie hatten vertraute Formen, aber ungewohnte Namen. Wir sahen einen sportlichen Chrysler Baalrog und einen aufgemotzten rosa Pick-up mit dicken Reifen, der Generalmotordiesel Transgorder hieß. Es gab einen Förd Pantocrator Sedan und ein Fárd Oriflamme Coupé. Besonders ausgefallen waren eine Limousine mit

»Der Betrag, den Sie uns schulden, entspricht ungefähr dem Einkommen eines Staats«

drei Scheinwerfern namens Archimandrit Trinitarier und ein VWW Oktopus mit vier Achsen und acht Rädern.

Hin und wieder erschien mit leisem Knall ein neues Auto. Manchmal verschwand ein Wagen mit lautem Sauggeräusch.

Wir hörten ein schwaches Rattern. In der Ferne erschien ein Wesen, das in einer Art zusammengeschnitztem Golfmobil auf uns zu fuhr. Als die Kreatur näher kam, sahen wir, dass sie groß, dünn, menschenähnlich und in eine leuchtende kirschrote Uniform gekleidet war.

Das Wesen hielt vor uns an. Ein Kästchen an seinem Gürtel sprach deutsch mit seltsamem Akzent. »Willkommen bei unserem Unternehmen. Ich bin hocheifrig, dass Sie uns fanden. Wenn sich neue Welten dem universellen Parken anschließen, reservieren wir ihnen einen Teil unserer Parkplätze. Kürzlich haben wir eine Sektion für primitive Primaten wie Sie eröffnet. Ich bin der Parkplatzanweiser und bin gekommen, um unsere Gebühr zu erheben.«

Er las die Einzelposten der Rechnung vor. »Erstens, Konzessionsgebühr. Zweitens, Kosten pro Autounterbringung. Drittens, Kosten pro Autorückgabe. Viertens, Gebühr für Verirren auf dem Parkplatz. Fünftens, Gebühr für Auffinden. Sechstens, Gebühr für Gespräch mit dem Parkplatzpersonal.«

Er riss ein Blatt vom Quittungsblock und überreichte es AI. »Wir erwarten Ihre Zahlung in Bitcoins binnen einer Woche. Der bescheidene Betrag, den Sie uns schulden, entspricht ungefähr dem Einkommen einer Ihrer örtlichen Verwaltungseinheiten, beispielsweise eines Staats. Falls Sie nicht genug Bitcoins aufreiben können, empfehle ich Ihnen, auf die Dienste von einigen hundert Ihrer besten Hacker zurückzugreifen. Wir erwarten prompte Bezahlung. Andernfalls müssen wir unseren Inkassobevollmächtigten bemühen, den Sie vermutlich nicht sehr sympathisch finden werden.«

Er wollte schon wieder wegfahren, als scheinbar aus dem Nichts noch ein Wesen auftauchte. Der Zweite war kurz und dicklich und von lebhaft oranger Farbe, einschließlich Overall, Augen und Haut.

Der Neue starrte den Parkplatzanweiser drohend an. »Hör auf, diese Primitivlinge zu belästigen. Wir haben dich gewarnt. Beim nächsten Mal werden wir finanzielle Belastungen mit entsprechenden Strafgebühren verhängen. Verziehe dich zu deiner

Bildungseinrichtung. Komm nicht wieder.«

Parkplatzanweiser und Golfmobil verschwanden mit leisem Sauggeräusch.

»S_{ie} seien Sie dankbar, dass wir Sie vor diesem minderqualifizierten Betrüger gerettet haben«, erklärte uns der Neuankömmling. »Er wäre im Stände gewesen, Ihren obskuren Planeten in den Bankrott zu treiben. Haben Sie noch nie etwas von dem quantenmechanischen Parktrick gehört? Das ist nicht einmal sein Parkplatz; der gehört zum Omniversum-Supermarkt. Wir werden Sie und Ihre Wagen jetzt erst einmal heimschicken und Ihre Verbindung mit dem Multiversum kappen, bis Sie gelernt haben, was Bitcoins wirklich anrichten.«

AI und ich schauten uns sprachlos an. Offenbar ist mit der neuen Physik nicht zu spaßen!

DER AUTOR

James Anderson abonnierte mit zwölf Jahren erstmals »Astounding Science Fiction«. Er ist Professor für Kognitionswissenschaft an der Brown University in Providence (US-Bundestaat Rhode Island) und konstruiert neuronale Netze als Modelle für menschliche Wahrnehmung.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 553, S. 122, 4. Januar 2018

VORSCHAU



JOSEF ISHARAH | WWW.JOSEFISHARAH.NET | FÜR QUANTA MAGAZINE

DIE ÄRA DER QUANTENTECHNOLOGIEN

Die präzise Kontrolle einzelner Atome und Lichtteilchen stellt neuartige Sensoren, abhörsichere Netzwerke und futuristische Computer in Aussicht. Ein groß angelegtes Forschungsprogramm der Europäischen Union will diese Quantentechnologien nun zur Marktreife führen – und spendiert den Physikern und Ingenieuren eine Milliarde Euro an Förderung. Der Architekt dieses »Quanten-Flaggschiffs« berichtet exklusiv für **Spektrum**, wie Quantenphysik aus Europa gleich mehrere technologische Branchen revolutionieren soll.



KRISTIANRELL | GETTY IMAGES / ISTOCK

SCHLANGEN-EVOLUTION

Vermutlich entstanden die Schlangen nicht im Wasser, sondern an Land: als Röhrengräber. Davon zeugen Strukturen im Innenohr von Urschlangen, die in der Dinosaurierzeit lebten. Der Verlust der Beine erlaubte große genetische Veränderungen bis hin zu einer sehr langen Wirbelsäule.



FLORENCE LOWY | CALIFORNIA DEPARTMENT OF WATER RESOURCES

GRUNDWASSER

Kalifornien und andere Teile der Welt leiden zunehmend unter Dürren. Bei gleichzeitig steigendem Wasserbedarf sind die Grundwasserspiegel vielerorts stark gesunken. Gezielte Überflutungen könnten helfen, die unterirdischen Speicher wieder aufzufüllen.



MATTHIAS MERIAN DER ÄLTERE | BELAGERUNG BAUTENS 1620

NEUE SERIE DREISSIGJÄHRIGER KRIEG

Weil der Streit um die »richtige« Religion auch sämtliche Entscheidungsgremien des Heiligen Römischen Reichs lahmlegte, entfachte der »Prager Fenstersturz« – ein Adelsaufstand gegen das Haus Habsburg – einen der blutigsten Kriege der Weltgeschichte.

NEWSLETTER

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

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 89,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), über 10 % günstiger als der Normalpreis.

Wunschgeschenk:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

Keine Mindestlaufzeit:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:

Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

Buch »Die verborgene Wirklichkeit«
Brian Greene zeigt, warum vieles dafür spricht, dass wir in den Weiten des Kosmos nicht allein sind, und welchen Parallelwelten die Astrophysiker auf der Spur sind.



Wählen
Sie Ihr
Geschenk



DIN-A5-Notizbuch

»Marie&Isaac&Albert&Stephen.«

Unser hauseigenes Notizbuch mit edlem Leineneinband, folienkaschierter Blindprägung, Farbschnitt sowie schwarzem Gummi- und Lesezeichenband. Mit dezentem Punktraster auf 160 Innenseiten 90-g-Premiumpapier gedruckt.

Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

www.spektrum.de/abo



Sie möchten Lehrstühle oder Gremien besetzen? Sie suchen weibliche Experten, Gutachter oder Redner zum Thema?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer Datenbank mit über 2.700 Profilen herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

