

Spektrum

der Wissenschaft

Zeugen des Urknalls

Was Gravitationswellen über die ersten Schwarzen Löcher verraten

IMMUNTHERAPIE Mit CAR-T-Zellen gegen Krebs

BILDGEBUNG Röntgenlaser offenbaren, wie sich Proteine verändern

VIETNAM Werkzeuge aus Holz prägten die Steinzeit

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

Ab sofort bei Ihrem
Zeitschriftenhändler!



Print | 5,90 €
Download | 4,99 €

www.spektrum.de/aktion/gesundessen



EDITORIAL

DIE DOPPELTE NOBEL-WETTE

Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Wissenschaftsjournalisten neigen für gewöhnlich nicht zu Wetten. Vor einigen Wochen jedoch keimte in der Redaktionskonferenz eine Diskussion darüber auf, welche Forschungen wohl im Oktober mit den Nobelpreisen geadelt werden. Alljährlich machen wir uns bei **Spektrum** einen Sport daraus, an den Tagen der Bekanntmachungen für die Auszeichnungen in Physik, Chemie und Physiologie oder Medizin in unserem Archiv nachzuschlagen, wer von den frisch verkündeten Laureaten denn schon für uns geschrieben hat. Immerhin mehr als 80 Nobelpreisträger zählen wir bis heute zu unseren Autorinnen und Autoren.

In besagter Konferenz stand die Festlegung der nächsten Titelt Themen auf dem Plan. Ein Kandidat lautete: Bilden Schwarze Löcher aus der frühesten Phase des Universums jenen Stoff, der als mysteriöse Dunkle Materie die Galaxien zusammenhält? Dieser Beitrag sei ja wohl für Heft 10.17 gesetzt, preschte ein Kollege vor. – Warum? Na, wegen des Physik-Nobelpreises! Der sei in diesem Jahr für die Entdeckung der Gravitationswellen fällig, und diese einst von Einstein vorhergesagten Wellen bildeten schließlich das beste Signal, anhand dessen man die Hypothese von den »primordialen« Schwarzen Löchern überprüfen könne. Dieser Argumentation folgte am Ende die gesamte Redaktion – und so finden Sie den Artikel der Kosmologen Juan García-Bellido und Sébastien Clesse nun ab S. 12. Zur Vertiefung führten wir außerdem ein Interview mit Karsten Danzmann, der mit seinen Arbeiten am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover wesentlich mit dazu beitrug, dass die Gravitationswellen 2015 erstmals nachgewiesen wurden (ab S. 20).

Wenn wir schon mit diesem Heft auf Nobelpreise wetten, dann aber richtig. Ein heißer Kandidat in der Medizin ist die Entdeckung des CRISPR/Cas-Systems – ein Immunmechanismus vieler Mikroorganismen und die Grundlage für das inzwischen weit verbreitete Genome Editing. Ab S. 50 erzählen wir die Geschichte des spanischen Mikrobiologen Francisco Mojica, der in den 1990er Jahren an Meeresbakterien entscheidende Vorarbeiten dafür leistete, dass CRISPR/Cas heute als »Genschere« weltweit die Labore erobert.

Wir sind sehr gespannt, ob wir mit der Auswahl dieser Artikel für das Oktoberheft den richtigen Riecher hatten!

Herzlich, Ihr

Carsten Könneker



NEU AM KIOSK AB 25. 8.!

Über die Tücken der Statistik, ob beim Gesetz der großen Zahlen oder bei Klimarekorden, lesen Sie im **Spektrum Spezial** Physik – Mathematik – Technik 3.17.

AUTOREN DIESER AUSGABE



KARSTEN DANZMANN

Der Physiker ist seit fast 30 Jahren an der Suche nach Gravitationswellen beteiligt. Im Interview ab S. 20 erklärt er, warum die ehemalige Nischendisziplin heute ein wichtiger Zweig der modernen Astronomie ist.



KARIN MÖLLING

Die deutsche Forscherin hält Viren für Mikroorganismen. Sie plädiert ab S. 42 dafür, gegen bedrohliche Infektionen mit Bakterien verstärkt deren natürliche Feinde einzusetzen: die Phagen.



PETRA FROMME UND JOHN SPENCE

Die Biochemikerin und der Physiker untersuchen in den USA die Zusammenhänge zwischen Struktur und Funktion von Molekülen. Wie das mit ultrakurzen Röntgenblitzen gelingt, erläutern sie ab S. 62.

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Eine Koralle als Maurer

Bild eines Riesensterns

Auf der Spur der
ersten Viren

Epigenetik bei Darwinfinken

Kleinster Neutrino-
detektor
der Welt

Psilocybin per Enzym

Diamanten im Neptun

24 FORSCHUNG AKTUELL

Neandertaler-Kontakte

Der Neandertaler trug DNA
vom frühen *Homo sapiens*.

Blick in einen Magneten

Eine neue Technik zeigt die
Spins in einem Festkörper.

Evolution des Sprechens

Affen können verschiedene
Vokale erzeugen.

Sechsfach koordinierter Kohlenstoff

Chemiker weisen ein
exotisches Molekül nach.

33 SPRINGERS EINWÜRFE

Die Liebe in den Zeiten der Roboter

Automaten verändern selbst
das älteste aller Gewerbe.

68 SCHLICHTING!

Säulen der Erde

Risse im Basalt formen
hexagonale Strukturen.

78 FREISTETTERS FORMELWELT

Das wichtigste Obst der Physikgeschichte

Das Gravitationsgesetz (zu
dem Newton angeblich ein
fallender Apfel inspirierte)
liefert auch Kenngrößen für
Kometenbahnen.

12 KOSMOLOGIE **DIE SCHWARZEN LÖCHER DES URKNALLS**

In der ersten Sekunde des Universums könnten Schwarze Löcher entstanden sein, von denen zahlreiche vielleicht bis heute überlebt haben. Sie wären plausible Kandidaten für die unsichtbare Dunkle Materie.

Von Juan García-Bellido und Sébastien Clesse

20 INTERVIEW

»BALD WIRD ES ERST RICHTIG SPANNEND«

Der Hannoveraner Physiker Karsten Danzmann verrät, welche großen Rätsel Gravitationswellen in Zukunft lösen könnten.

Von Manon Bischoff und Robert Gast

34 IMMUNTHERAPIE **AUFTRAGSKILLER GEGEN KREBSZELLEN**

Mit künstlich veränderten Abwehrzellen erzielen Ärzte seit einigen Jahren verblüffende Erfolge in der Krebsmedizin.

Von Avery D. Posey, Carl H. June und Bruce C. Levine

42 MEDIZIN **VIREN STATT ANTIBIOTIKA**

Serie: Neue Einblicke in die Welt der Viren (Teil 3) Phagen – Viren von Bakterien – lassen sich effektiv gegen schwierige Krankheitskeime einsetzen. Noch behindern behördliche Vorschriften solche Therapien.

Von Karin Mölling

50 GENETIK **DIE RÄTSEL DES CRISPR/CAS-SYSTEMS**

Alle Welt redet von dem gentechnischen Potenzial des neuen Werkzeugs. Doch nicht minder interessant sind seine biologischen Ursprünge.

Von Heidi Ledford

54 ENERGIEPOLITIK **KLIMAFAKTOR INDIEN**

Nur wenn sich der Ressourcenverbrauch der aufstrebenden Gesellschaft Indiens dramatisch ändert, können die weltweit anvisierten Klimaziele erreicht werden.

Von Varun Sivaram

62 STRUKTURBIOLOGIE **MOLEKULARE SCHNAPPSCHÜSSE**

Mit Röntgenlasern erhalten Physiker einmalige Einblicke in den Ablauf biochemischer Reaktionen.

Von Petra Fromme und John C. H. Spence

70 ARCHÄOLOGIE **VIETNAM'S ALTSTEINZEIT ALS BAMBUSZEIT?**

Serie: Archäologie in Vietnam (Teil 1) Als Europas Jäger und Sammler ausgefeiltes Steinwerkzeug kannten, begnügten sich die Menschen in der Region Vietnam mit grobem Geröllgerät.

Von Ingo Kraft und Johann Friedrich Tolksdorf

80 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **DURCHBLICK-POLYEDER**

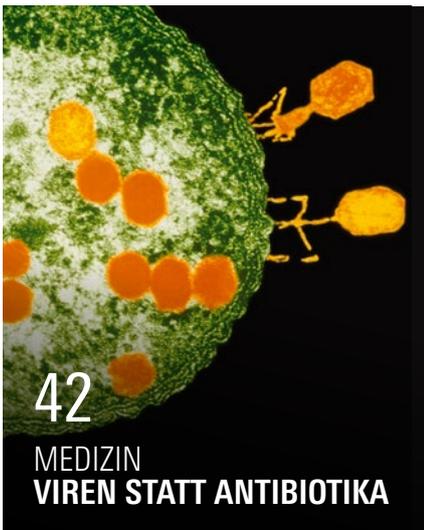
Ulrich Mikloweit macht mit kunstvollen Mitteln verborgene Strukturen in geometrischen Körpern sichtbar.

Von Christoph Pöppe



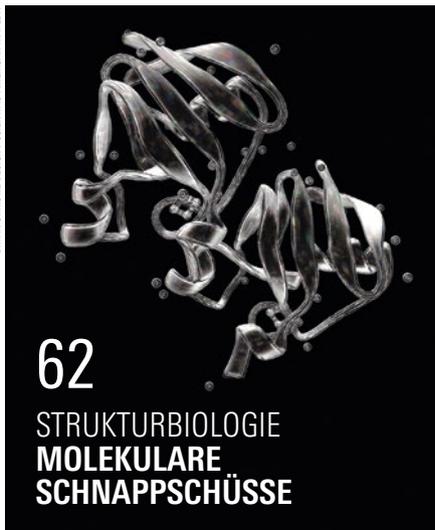
12

TITELTHEMA
**DIE SCHWARZEN LÖCHER
DES URKNALLS**



42

MEDIZIN
VIREN STATT ANTIBIOTIKA



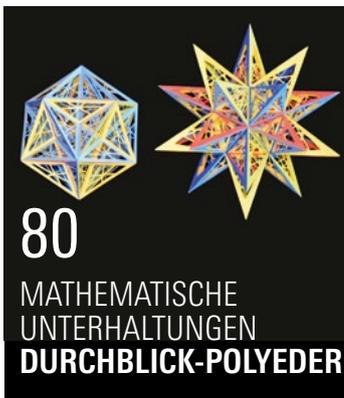
62

STRUKTURBIOLOGIE
**MOLEKULARE
SCHNAPPSCHÜSSE**



70

ARCHÄOLOGIE
**VIETNAMS ALTSTEINZEIT ALS
BAMBUSZEIT?**



80

MATHEMATISCHE
UNTERHALTUNGEN
DURCHBLICK-POLYEDER

86 REZENSIONEN

Stephen Cooter, Matthew Dyas: Kräfte der Natur
Ernst Peter Fischer: Das große Buch der Physik
Gudrun Bucher: Die Entdeckung des Nordpazifiks
Wolfgang König (Hg.): Mathematics and Society
Michael Burger: Unser Baby im Ultraschall

93 ZEITREISE

Von der Schwebbahn bis zur Platinenproduktion

94 LESERBRIEFE

95 IMPRESSUM

96 FUTUR III

Homo Hohlwelt
Bloß nicht zu Einstein beten!

98 VORSCHAU

Titelbild:
casfotoarda / stock.adobe.com; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft

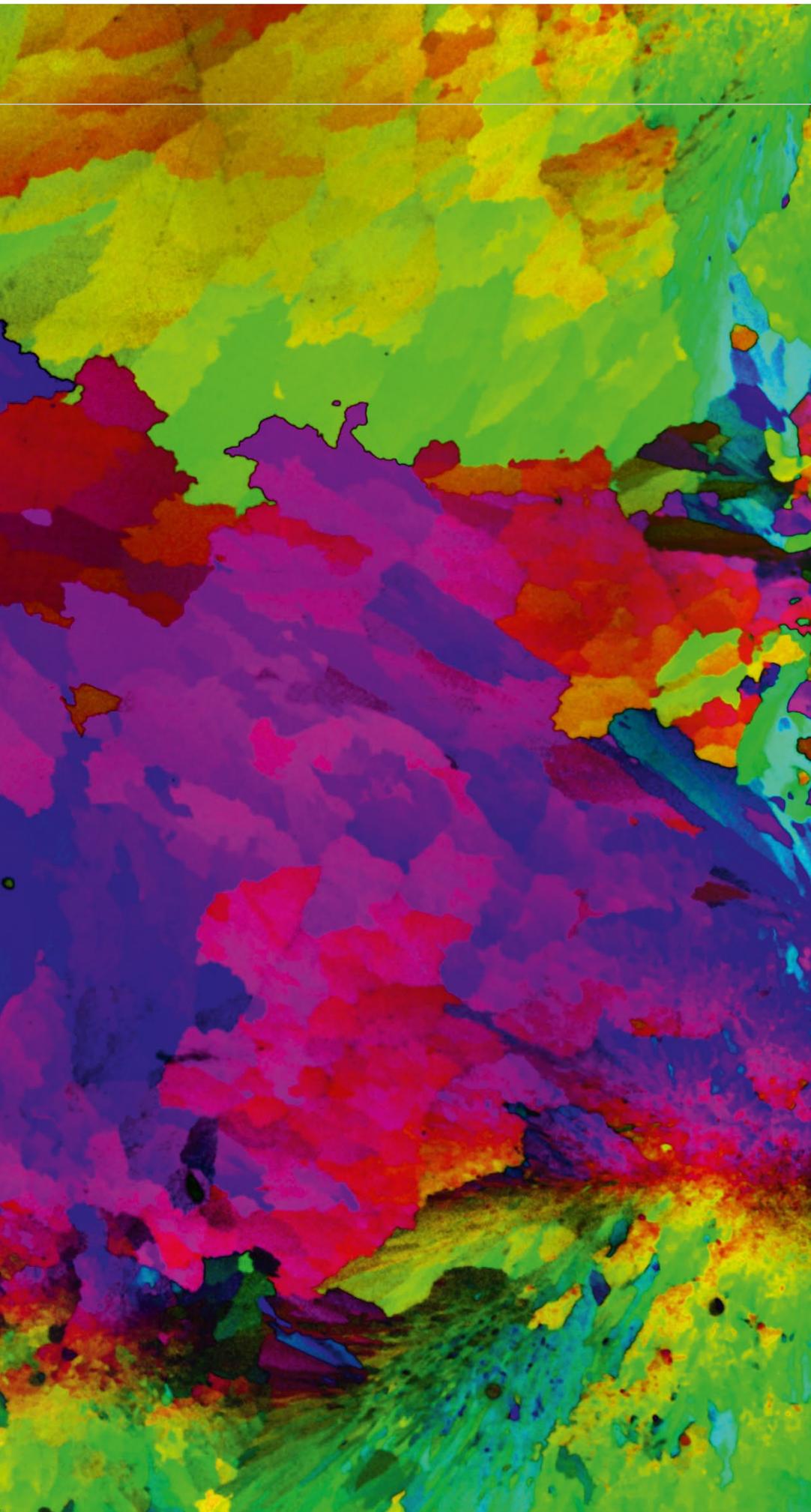


Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

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

SPEKTROGRAMM





PUPA GILBERT, CHANGYU SUN, CAYLA STILERY / UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON; MATTHEW MARCUS, ADVANCED LIGHT SOURCE, LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

DIE KORALLE ALS MAURER

Ein Team um Pupa Gilbert von der University of Wisconsin-Madison hat eine farbenprächtige Aufnahme des Skeletts von Steinkorallen der Art *Stylophora pistillata* angefertigt. Auf dem gerade mal 280 Mikrometer breiten Bild eines Photoemissionselektronenmikroskops heben die Wissenschaftler mit Farben die unterschiedliche Orientierung der Kalkkristalle hervor. Die Größe der Strukturen legt den Forschern zufolge nahe, dass Korallen bis zu 400 Nanometer große Mineralklumpen im Inneren ihres Körpers bilden. Bisher gingen Experten davon aus, die Nesseltiere würden den Kalk in deutlich kleineren Portionen ablagern. Der gute Schutz durch das Gewebe könnte Korallenriffe weniger anfällig für die Versauerung der Meere machen, die mit einem Anstieg der CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre einhergeht.

PNAS 10.1073/pnas.1707890114, 2017



Der Rote Überriese Antares zählt zu den hellsten Sternen am Nachthimmel. Wegen seiner rötlichen Farbe wird er oft mit dem Planeten Mars verwechselt. Eigentlich ist der Stern zu weit weg, um Details seiner Oberfläche zu erkennen. Astronomen haben nun aber mit Hilfe mehrerer Teleskope ein Bild seiner Oberfläche rekonstruiert. Darauf kann man zwei helle Flecken erahnen sowie eine turbulente Atmosphäre.

ASTRONOMIE BILD EINES RIESENSTERNS

► Astronomen haben erstmals ein detailliertes Bild von Antares angefertigt. Der Stern ist etwa 700-mal so groß wie die Sonne, 550 Lichtjahre von der Erde entfernt und der markanteste Punkt im Sternbild Skorpion. Der Rote Überriese ist am Ende seiner Lebenszeit angekommen und daher stark angeschwollen. Früher

oder später wird er in einer Supernova explodieren.

Trotz seiner enormen Größe ist Antares zu weit entfernt, als dass man mit einem einzelnen Teleskop detaillierte Bilder seiner Oberfläche machen könnte. Keiichi Ohnaka von der chilenischen Universidad Católica del Norte und zwei Forschern vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn ist dies nun trotzdem gelungen. Sie nutzten das Very Large Telescope Interferometer (VLTI) in

Chile für ihre Beobachtungen – es kombiniert das Licht von drei 1,8-Meter-Teleskopen. Dadurch erreicht die Auflösung der Bilder die eines Riesenteleskops mit 82 Meter Spiegeldurchmesser.

Anschließend spaltete das Team die vom VLTI aufgefangene Infrarotstrahlung in einzelne Spektralbänder auf und konnte so nachvollziehen, in welche Richtung sich einzelne Regionen der Sternoberfläche bewegen. Wegen des

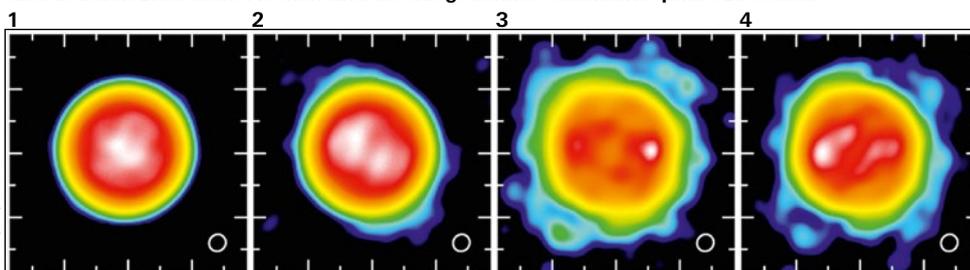
Dopplereffekts erscheint Licht von heißem Gas, das sich auf uns zubewegt, leicht ins Blaue verschoben, die Strahlung von sich entfernenden Gebieten wird dagegen röter.

Aus diesen Daten fertigten die Astronomen eine Karte des Sterns an, welche die Strömungsrichtungen auf der Oberfläche und in der Atmosphäre des Giganten wiedergibt. Aus ihr rekonstruierte das Team schließlich ein verschwommenes Bild von Antares – so oder so ähnlich müsste der Überriese auf einer gewöhnlichen Teleskopaufnahme erscheinen.

Demnach ist die Sternatmosphäre des Riesen unregelmäßiger und weiter ausgedehnt als erwartet. Vermutlich sind hier Prozesse im Gang, die über die von unserer Sonne bekannte Konvektion hinausgehen.

Nature 10.1038/nature23445, 2017

In der Hülle von Antares geben Kohlenmonoxidmoleküle Infrarotlicht ab. Die Forscher analysierten diese Strahlung bei verschiedenen Wellenlängen. Auf den Aufnahmen 3 und 4 sind deutlich zwei helle Flecken und die ausgedehnte Sternatmosphäre zu sehen.



OHNAKA, K. ET AL., VIBRIOUS ATMOSPHERIC MOTION IN THE RED SUPERGIANT STAR ANTARES. IN: NATURE 546, S. 310-312, 2017, FIG. 1, A-D

MIKROORGANISMEN AUF DER SPUR DER ERSTEN VIREN

► Eine Mikrobe aus der Antarktis könnte Wissenschaftlern helfen, den Ursprung von Viren zu entschlüsseln. Dieser beschäftigt Biologen seit Langem: Sind die infektiösen Partikel Vorfahren von Organismen und somit älter als das zelluläre Leben? Oder entwickelten sich die ersten Viren aus Bakterien, nachdem diese die Erde schon in Besitz genommen hatten? Für beide Szenarien gibt es gute Argumente, schließlich sind Viren im

Grunde nur von einer Schutzhülle umgebene Erbgut-Transporter. Damit sind sie viel einfacher gebaut als zelluläre Mikroorganismen. Andererseits entfalten Viren ihr Potenzial erst, wenn sie in Zellen eindringen können und dort Kopien von sich anfertigen.

Ein Team um Ricardo Cavicchioli von der University of New South Wales in Australien glaubt nun Fortschritte in dieser Frage gemacht zu haben. Die Mikrobiologen haben eine auf den Rauer-Inseln in der Ostantarktis lebende, zu den Archaeen zählende Mikrobe analysiert. Im Inneren von *Halorubrum*

lacusprofundi R1S1 entdeckten die Forscher eine ringförmige DNA. Solch ein Plasmid kann sich unabhängig vom Erbgut der Mikrobe replizieren.

Eigentlich sind Plasmide in Bakterien nicht ungewöhnlich. Oft steuern sie hilfreiche Eigenschaften bei, beispielsweise Resistenzen. Das Archaeen-Plasmid mit der Bezeichnung pR1SE hat allerdings eine ungewöhnliche Funktion: Es kodiert für Proteine, mit denen der DNA-Ring eine kleine Blase um sich selbst bildet, ein so genanntes Vesikel. Darin kann das Plasmid die Zelle verlassen und in andere, bis dahin

plasmidfreie Archaeen eindringen und diese »infiltrieren«.

Damit ähnele pR1SE einem Virus, so die Mikrobiologen. Eine weiterentwickelte Variante des Plasmids, die irgendwann die zusätzliche Eigenschaft erworben hat, eine feste Hülle zu bilden, wäre demnach als genereller Vorgänger der Viren denkbar. Das wiederum würde nahelegen, dass sich Viren erst nach den Bakterien und Archaeen entwickelt hätten – um dann aber recht schnell eine große Rolle zu spielen.

Nat. Microbiol. 10.1038/s41564-017-0009-2, 2017

BIOLOGIE EPIGENETIK BEI DARWINFINKEN

► Darwinfinken der Art *Geospiza fortis*, die in bewohnten Gebieten der Galapagosinseln leben, sind offenbar größer als ihre Artgenossen in der Wildnis – und das, obwohl nur zehn Kilometer die Lebensräume der Populationen trennen. Ein Forscherteam um Michael K. Skinner von der Washington State University hat in den Jahren 2008 bis 2016 etwa 800 der Tiere eingefangen und physische Merkmale erfasst. Demnach sind »urbane« Darwinfinken nicht nur fünf Prozent schwerer als ihre ländlichen Artgenossen, auch ihre Schnäbel sind einen halben Millimeter größer.

Die Wissenschaftler fanden jedoch keinen nennenswerten Unterschied in den DNA-Sequenzen der Populationen. Stattdessen hält es das Team für möglich, dass epigenetische Prägungen die Finken in der Zivilisation verändert haben. Zur Epigenetik zählen Biologen Funktionsänderungen von Genen, die nicht auf Mutationen der DNA-Sequenz beruhen, möglicherweise aber trotzdem vererbt werden. Sie gehen auf Umweltfaktoren zurück, beispielsweise die Ernährung.

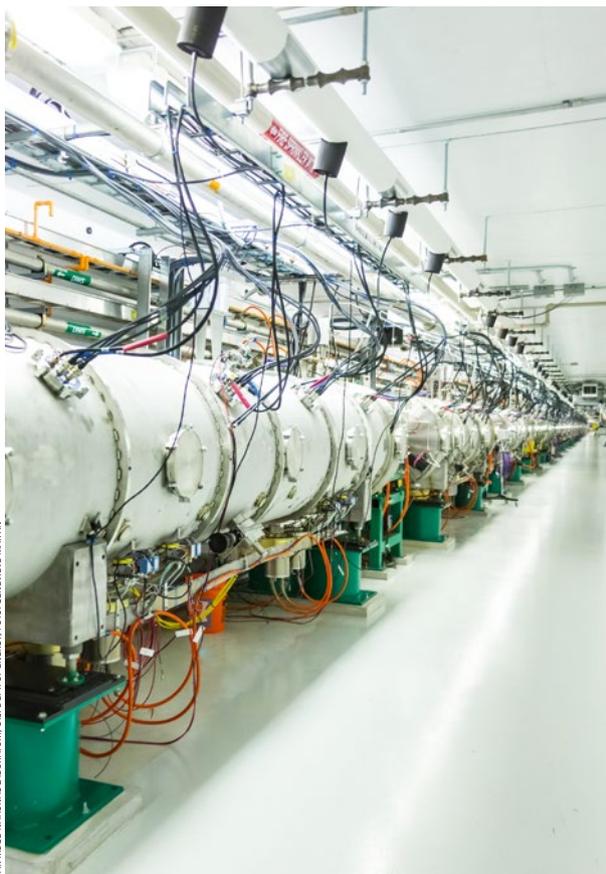
Konkret untersuchten die Forscher eine bestimmte Form von chemischer Veränderung des Erbguts, die so genannte Methylierung. Sie zählt zu den bekanntesten epigenetischen Modifikationen. Bei ihr docken Methylgruppen an Nukleinbasen der DNA an. Wenn Erbgutsequenzen methyliert sind, können die dort befindlichen Gene unterdrückt oder auch aktiviert werden.



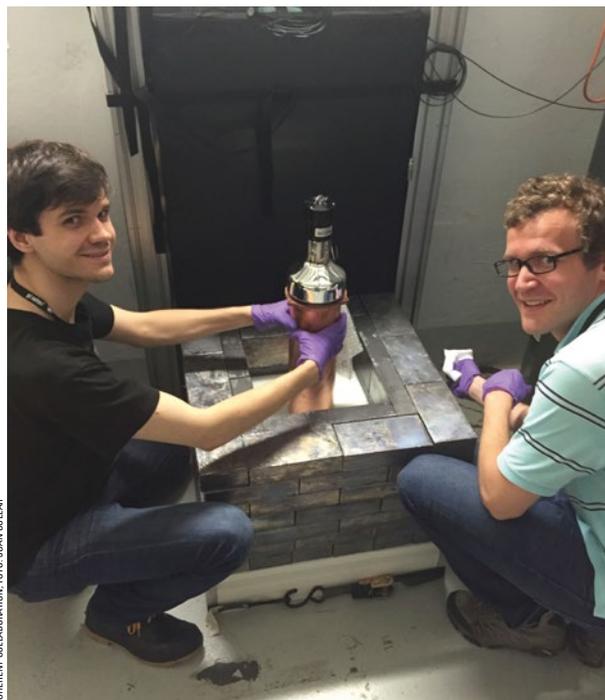
Die Ernährung von Mittel-Grundfinken könnte die Funktion mancher Gene verändern.

Tatsächlich stieß das Team um Skinner bei den urbanen Darwinfinken auf deutliche Unterschiede in der Methylierung. Sie könnten eine Erklärung für die Größe der urbanen Vögel sein, spekulieren die Forscher. Dafür spricht, dass sich die epigenetischen Veränderungen bei den Darwinfinken schnell verbreitet zu haben scheinen. Nennenswerte Siedlungen gibt es auf den Galapagosinseln erst seit gut 50 Jahren. Noch ist allerdings offen, wie die entdeckten DNA-Methylierungen die veränderten Körpermerkmale der Darwinfinken hervorbringen sollen.

BMC Evol. Biol. 10.1186/s12862-017-1025-9, 2017



OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, U.S. DEPT. OF ENERGY. FOTO: GENEVIEVE MARTIN



COHERENT KOLLABORATION. FOTO: JUAN COLLAR

Neutrinos entstehen unter anderem in der Spallation Neutron Source, einem Teilchenbeschleuniger im Oak Ridge National Laboratory im US-Bundesstaat Tennessee (links). Physiker der COHERENT-Kollaboration haben einen handlichen Detektor für die flüchtigen Partikel entwickelt (rechts).

PHYSIK KLEINSTER NEUTRINODETEKTOR DER WELT

► Ein internationales Physikerteam hat erstmals beobachtet, dass Neutrinos an Atomkernen abprallen. Forscher suchen nach dieser »kohärenten Neutrinostreuung« bereits seit mehr als 40 Jahren, konnten sie bisher aber nicht aufspüren. Neutrinos sind fast masselose Elementarteilchen ohne elektrische Ladung, die gewöhnliche Materie meist unmerklich durchdringen.

Selbst wenn sie direkt mit einem Nukleus kollidieren, ist der resultierende Rückstoß so winzig, dass er sich kaum von der natürlichen Bewegung von Atomen unterscheiden lässt. Bisherige Neutrinodetektoren basieren daher auf anderen Prinzipien: Beispielsweise wandeln vorbeifliegende Neutrinos manchmal ein Neutron eines Atomkerns in ein Proton um. Dabei entsteht ein Elektron, welches Messinstrumente nachweisen können. Allerdings müssen Forscher dafür Detektoren aus tonnenschweren, mit einer speziellen Flüssigkeit gefüllten Tanks bauen.

Der Detektor des 81-köpfigen Teams um Juan Collar von der University of Chicago ist hingegen kaum

größer als eine Champagnerflasche. Er besteht aus einem 14,6 Kilogramm schweren, mit Natrium dotierten Kristall aus Zäsiumjodid. In dem Material stoßen Neutrinos vergleichsweise geringer Energie besonders häufig auf Atomkerne. Nach solch einer Kollision bewegen sich die Nukleonen im Kristallgitter ein wenig und senden dabei kurze Lichtblitze aus.

Die Physiker wiesen im Lauf von 15 Monaten insgesamt 134 Neutrino-Atomkern-Stöße nach. Die nötigen Neutrinos lieferte ein Protonenbeschleuniger am Oak Ridge National Laboratory im US-Bundesstaat Tennessee, der Quecksilberatome zertrümmert. Dabei entstehen neben Neutrinos auch die deutlich schwereren Neutronen. Da sie den Detektor ebenfalls ausschlagen lassen würden, mussten die Forscher diesen durch eine zwölf Meter dicke Wand abschirmen. Den Wissenschaftlern zufolge kommt das neue Gerät unter anderem für den Einsatz in Kernreaktoren in Frage, in denen Neutrinos in großer Zahl entstehen.

Science 10.1126/science.aao0990, 2017

BIOCHEMIE PSILOCYBIN PER ENZYM

► Deutsche Forscher haben Psilocybin mit Enzymen hergestellt, die von Bakterien erzeugt wurden. Die Substanz ist der Wirkstoff halluzinogener Pilze (»magic mushrooms«). Derzeit prüfen Mediziner ihren Nutzen gegen Angstzustände bei Krebspatienten sowie gegen Depressionen und Nikotinsucht.

Die Gruppe um Dirk Hoffmeister von der Universität Jena hat den Syntheseweg von Psilocybin nachvollzogen und dabei eine Überraschung erlebt: Die für die Synthese nötigen Reaktionen fanden in anderer Reihenfolge statt als vermutet – und das, obwohl Psilocybin bereits Mitte des 20. Jahrhunderts gründlich erforscht wurde.

Zunächst sequenzierte Hoffmeisters Team das Genom eines Psilocybin-Pilzes und identifizierte so die Baupläne vier geeigneter Enzyme für die Synthese. Anschließend pflanzten die Biochemiker Bakterien die entsprechenden Gene ein und gewannen damit die katalytischen Proteine. Ausgehend von 4-Hydroxy-L-Tryptophan, einem Abkömmling der Aminosäure Tryptophan, genügten drei Enzyme für die Herstellung von Psilocybin. Ein viertes war nötig, um die Umsetzung von Tryptophan, das dem Pilz selbst als Ausgangsstoff der Produktion dient, in sein 4-Hydroxyderivat zu katalysieren.

Die Arbeit könnte den Weg zu einem großtechni-

schen Herstellungsverfahren von Psilocybin ebnen. Ein solches würde bei steigendem Bedarf des psychotropen Stoffs an Bedeutung gewinnen. Es ist zwar bereits möglich, Psilocybin mit klassischen chemischen Methoden zu produzieren. Sie gelten jedoch als aufwändig und ineffizient.

Angew. Chem. 10.1002/ange.201705489, 2017

PLANETEN- FORSCHUNG DIAMANTEN IM NEPTUN

► Im Inneren von Uranus und Neptun gibt es vermutlich unzählige Diamanten. Das schließt ein internationales Forscherteam um Dominik Kraus am Helmholtz-Zentrum in Dresden-Rossendorf aus einem Laborexperiment, mit dem die Wissenschaftler chemische Prozesse im

Inneren der Eisriesen nachgestellt haben.

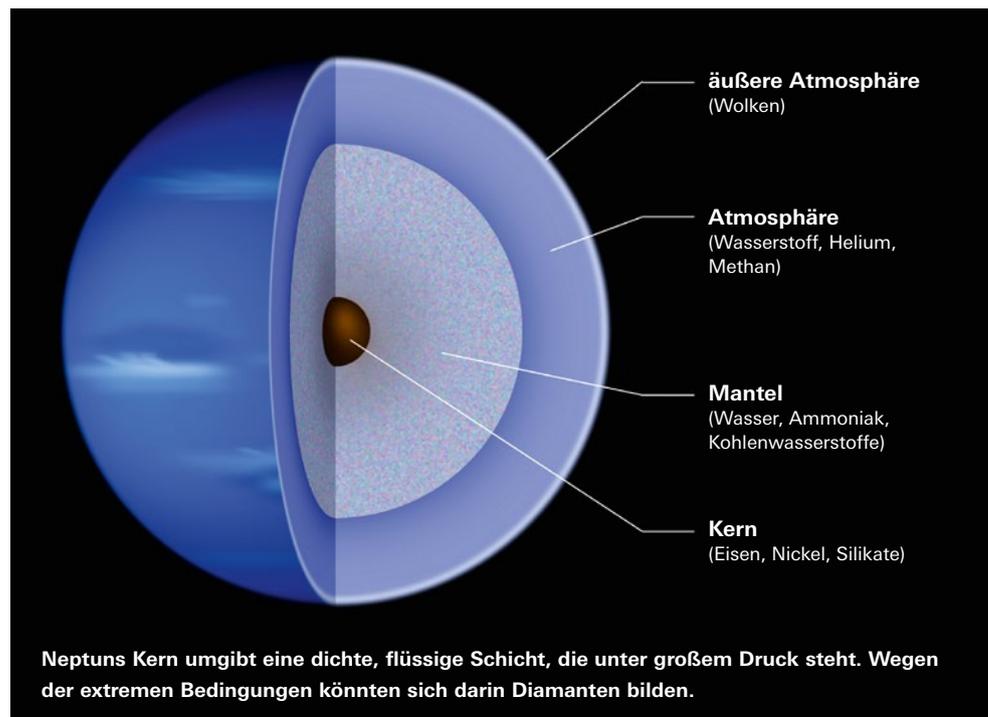
Die beiden äußeren Planeten im Sonnensystem haben eine dicke Atmosphäre aus Wasserstoff und Helium. Darunter vermuten Forscher seit Längerem eine weit ausgedehnte Region aus Wasser, Ammoniak und Methan, die von den darüberliegenden Schichten stark zusammengedrückt wird. In etwa 10 000 Kilometer Tiefe, einem Fünftel des Neptundurchmessers, sind Druck und Temperatur bereits so hoch, dass sich die Kohlen- und Wasserstoffatome des Methans voneinander trennen können.

Um diesen Strukturwandel nachzustellen, nutzten die Materialwissenschaftler um Kraus zwei sehr starke Laser des Stanford Linear Accelerator Center. Die Lichtpulse trafen kurz hintereinander auf ein hauchdünnes Plättchen aus dem Kohlenwasserstoff Polystyrol. Beim Verdampfen

der Probe entstanden Schockwellen, die das Material für einige Nanosekunden auf 5000 Grad Celsius erhitzten und es unter das 1,5-Millionenfache des irdischen Atmosphärendrucks setzten.

Mittels ultrakurzer Röntgenblitze konnte das Team beobachten, wie die chemische Verbindung auf die extremen Bedingungen reagierte. Wie vermutet trennten sich Wasserstoff- und Kohlenstoffatome voneinander, woraufhin letztere die Kristallstruktur von Diamant bildeten. Auf Neptun und Uranus müssten sich die wenige Nanometer großen Partikel zu größeren Klumpen zusammenfinden, spekulieren die Forscher. Letztlich würden die Diamanten in Richtung des Planetenkerns sinken und sich dort in einer extrem hochkarätigen Schicht sammeln.

Nature Astronomy 10.1038/s41550-017-0219-9, 2017



KOSMOLOGIE DIE SCHWARZEN LÖCHER DES URKNALLS

Schon gleich nach seinem Beginn könnte eine dichte Schar Schwarzer Löcher das junge Universum durchsetzt haben. Viele der Objekte haben vielleicht bis heute überlebt. Sie wären plausible Kandidaten für die unsichtbare und rätselhafte Dunkle Materie.

» [spektrum.de/artikel/1496891](https://www.spektrum.de/artikel/1496891)



Einander umkreisende Schwarze Löcher können Physiker inzwischen anhand von Gravitationswellen vermessen. Möglicherweise verraten die Signale sogar, ob die Objekte aus der Urzeit des Alls stammen.



Juan García-Bellido (links) ist Professor am Institut für theoretische Physik der Universität Madrid und Mitglied des Dark Energy Survey sowie der europäischen Weltraummissionen Euclid und LISA (Laser

Interferometer Space Antenna). **Sébastien Clesse** ist ein belgischer Kosmologe; er forscht als Postdoc an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und ist Mitglied der Euclid-Mission sowie des Radioteleskops Square Kilometre Array.

► In den Tiefen des Alls umkreisten sich vor mehr als einer Milliarde Jahren zwei Schwarze Löcher auf immer engeren Spiralbahnen und stürzten schließlich ineinander. Der heftige Vorgang erschütterte das Gefüge der Raumzeit und erzeugte Gravitationswellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit in alle Richtungen ausbreiteten. Im September 2015 erreichten die Schwingungen schließlich unseren Planeten und machten sich in den Sensoren des Gravitationswellenobservatoriums LIGO (Advanced Laser Interferometer Gravitational Observatory) in den USA durch ein charakteristisches Signal bemerkbar.

Dieser erste direkte Nachweis von Gravitationswellen bestätigte Albert Einsteins 100 Jahre alte Vorhersage solcher Raumzeitschwingungen – die Einstein allerdings für niemals nachweisbar gehalten hatte. Dem Signal zufolge muss jedes der beiden Schwarzen Löcher 30-mal schwerer als die Sonne gewesen sein. Damit waren die Massen zwei- bis dreimal größer als die von üblichen Schwarzen Löchern, die aus Supernova-Explosionen massereicher Sterne hervorgehen. Konnten derartige Objekte überhaupt aus Sternen entstehen? Und selbst wenn zwei besonders massereiche Sterne unabhängig voneinander als solche Monstren endeten, wäre es – zumindest im Verlauf der vermuteten Entwicklung des Universums – unwahrscheinlich, dass sie anschließend zueinanderfanden und verschmolzen. Darum liegt die Annahme nahe, diese massereichen Schwarzen Löcher könnten auf irgendeine andere Weise entstanden sein, ganz ohne Vorläufersterne. Vielleicht hat LIGO also nicht nur Gravitationswellen entdeckt, sondern etwas noch Erstaunlicheres: Schwarze Löcher, die es bereits gab, bevor sich die ersten Sterne bildeten.

Zwar hat noch niemand solche »primordialen« Schwarzen Löcher gesehen, doch nach manchen theoretischen Modellen sind sie in riesigen Mengen aus dem heißen und dichten Plasma hervorgegangen, das kaum eine Sekunde nach dem Urknall den Kosmos erfüllte. Diese verborgenen Massen würden mehrere Rätsel der modernen Kosmologie lösen. Insbesondere könnten primordiale Schwarze Löcher wenigstens teilweise die Dunkle Materie erklären – jene unsichtbaren 85 Prozent der kosmischen Gesamtmaterie, die durch ihre Schwerkraft Galaxien und Galaxienhaufen stärker binden, als sich durch sichtbare Materie allein begründen lässt. Künftige Forschungen mit LIGO

und anderen Anlagen werden diese Ideen bald überprüfen und möglicherweise ein radikal neues Bild des Kosmos zeichnen (siehe Interview ab S. 20).

Schwarze Löcher sind an sich ideale Kandidaten für Dunkle Materie, da sie kein Licht aussenden. Zusammen mit anderen dunklen Himmelskörpern wie vagabundierenden Planeten und Braunen Zwergen bildeten sie als MACHOs (massive compact halo objects) anfangs die favorisierte Antwort auf die Frage, woraus die Dunkle Materie besteht. Die MACHOs sollten sowohl den jede Galaxie kugelförmig umgebenden Halo aus unsichtbarer Masse bilden als auch in der Nähe des leuchtenden Galaxienzentrums sitzen, um mit ihrer Gravitationsanziehung die sonst unverständlichen Bewegungen der Sterne und Gase an den Galaxienrändern zu erklären. Vereinfacht ausgedrückt rotieren die Galaxien zu schnell, als dass die sichtbaren Massen der Sterne sie zusammenhalten könnten. Die Dunkle Materie liefert die zusätzliche Anziehung, die verhindert, dass die rotierenden Galaxien ihre Sterne davonschleudern.

Niedergang der MACHOs, Aufstieg der WIMPs

Doch wenn MACHOs den größten Teil der Dunklen Materie ausmachen, müssen sie auch andere Beobachtungen erklären. Die Dunkle Materie formt die größten Strukturen im Universum; sie prägt Ursprung und Wachstum von Galaxien, Galaxienhaufen und Superhaufen. Die kosmischen Gebilde entstehen durch den Gravitationskollaps von Gasklumpen innerhalb der Dunkle-Materie-Halos. Kosmologen haben die räumliche Verteilung dieser Klumpen präzise durch weiträumige Galaxiendurchmusterungen vermessen und mit winzigen Temperaturfluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung, dem Nachglühen des Urknalls, in Zusammenhang gebracht. Zudem krümmt die Masse der in großen Galaxien und Haufen verborgenen Dunklen Materie den Raum und beugt das von noch weiter entfernten Hintergrundobjekten ausgehende Licht durch den so genannten Gravitationslinseneffekt.

Die MACHO-Hypothese fiel vor etwa einem Jahrzehnt in Ungnade, als die Suche nach indirekten Indizien für kompakte dunkle Massen ergebnislos blieb. Die Astronomen hatten dabei auf eine Abart des Gravitationslinseneffekts gehofft: Beim so genannten Mikrolinseneffekt zieht ein Schwarzes Loch, ein Brauner Zwerg oder ein großer Planet vor einem Hintergrundstern vorbei und verstärkt dessen Licht vorübergehend wie ein Brennglas. Mehrere jahrelange Mikrolinsen-Durchmusterungen von Millionen Sternen in der Großen und Kleinen Magellanschen Wolke, den wichtigsten Begleitgalaxien der Milchstraße, ergaben aber keinen Hinweis darauf. Den Messungen zufolge konnten MACHOs von bis zu ungefähr zehn Sonnenmassen unmöglich den Hauptbestandteil der Dunklen Materie bilden. Deshalb favorisierten die Theoretiker anschließend eine andere Erklärung, die auf schwach wechselwirkenden Teilchen beruhte, den WIMPs (weakly interacting massive particles).

WIMPs werden von gewissen Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik vorhergesagt, lassen

sich aber womöglich noch schwieriger aufspüren als die MACHOs. Auch nach jahrzehntelanger Suche mit Teilchenbeschleunigern, unterirdischen Detektoren und Weltraumteleskopen ist bisher keine Spur der WIMPs aufgetaucht. Daher wandten sich einige Forscher wieder der MACHO-Hypothese zu, insbesondere den primordialen Schwarzen Löchern. Doch welcher Vorgang konnte diese seltsamen Objekte über das ganze beobachtbare Universum verstreut haben, und wieso waren sie so lange unentdeckt geblieben?

Als sich subatomare Schwankungen enorm vergrößerten

Die britischen Kosmologen Bernard Carr und Stephen Hawking ersannen primordiale Schwarze Löcher schon in den 1970er Jahren. Sie untersuchten solche mit einer Masse unterhalb derer irdischer Berge, doch derart winzige Vertreter ihrer Art wären längst verschwunden. Im Lauf der rund 14 Milliarden Jahre langen Geschichte unseres Universums müssten sie durch einen von Hawking entdeckten quantenmechanischen Prozess, die Hawking-Strahlung, restlos verdampft sein. Die Physiker zogen allerdings bereits die Möglichkeit in Betracht, deutlich massereichere Schwarze Löcher, die langsamer verdampfen, könnten noch immer existieren.

Die Idee, solche primordialen Objekte würden zur Dunklen Materie beitragen, untersuchten Theoretiker in den 1990er Jahren näher. Dabei stützten sich die Wissenschaftler auf das Konzept der kosmischen Inflation. Anfang der 1980er Jahre hatte der US-Physiker Alan Guth erstmals die Vorstellung, unmittelbar nach dem Urknall habe es eine kurze Phase enormer Expansion gegeben. In nur 10^{-35} Sekunden wurden demnach zwei weniger als einen Atomradius voneinander entfernte Punkte um vier Lichtjahre auseinandergerissen – also auf eine Entfernung, die unserer zu den nächsten Sternen entspricht. Dabei vergrößerte die Inflation winzige Quantenfluktuationen auf makroskopische Maßstäbe und übersäte das wachsende Universum mit unterschiedlich dichten Materie- und Energiegebieten, aus denen alle heutigen Strukturen hervorgingen. Die Inflationstheorie mutet zwar bizarr an, wird aber nach Ansicht der meisten Kosmologen durch die Beobachtung von Fluktuationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung gestützt.

1996 entdeckte einer von uns (García-Bellido) zusammen mit Andrei Linde von der Stanford University in Kalifornien und David Wands von der University of Portsmouth in England, dass die Inflation im Spektrum der Dichtefluktuationen des frühen Universums schmale Spitzen erzeugen kann (siehe Infografik S. 16/17). Wie wir zeigten, sollten inflationär aufgeblähte Quantenfluktuationen besonders dichte Regionen schaffen, die weniger als eine Sekunde nach dem Ende der Inflation zu einer Schar Schwarzer Löcher kollabieren. Diese werden dann zu Dunkler Materie und bilden den größten Teil des Materiegehalts im heutigen Universum. Das Modell erzeugte eine Population von Schwarzen Löchern mit gleicher Masse, die von dem in der kollabierenden Region enthaltenen Energiebetrag abhängt. Bald wandten viele andere Teams die Idee auf unterschiedliche Inflationsmodelle an.

2015 entwickelten wir (Clesse und García-Bellido) ein ähnliches Szenario wie das von 1996, bei dem die primordialen Fluktuationen jedoch statt scharfer Spitzen ein breites Maximum der Energiedichte aufweisen und zu Schwarzen Löchern ganz unterschiedlicher Masse führen. In diesem Szenario kollabieren eng benachbarte große Dichtefluktuationen zu Clustern von diversen Schwarzen Löchern mit einem Hundertstel bis zu dem 10000-Fachen der Masse unserer Sonne. Binnen einer halben Million Jahre nach dem Urknall kann jeder sich entwickelnde Cluster in einem Volumen, das sich bloß über einige hundert Lichtjahre erstreckt, Millionen von primordialen Schwarzen Löchern enthalten.

In den Clustern liegen die Schwarzen Löcher so dicht beisammen, dass die von LIGO entdeckte Verschmelzung keine unwahrscheinliche Ausnahme mehr bildet. Von Zeit zu Zeit kommen sich zwei davon nahe, umkreisen einander unter dem Zwang ihrer Schwerkraft auf immer engeren Bahnen und senden dabei Gravitationswellen aus. Wir sagten im Januar 2015 voraus, LIGO würde die Gravitationswellen solch massereicher Verschmelzungen entdecken – wie es im Herbst dann tatsächlich der Fall war. Sollten LIGO und andere Anlagen innerhalb der kommenden Jahre viele ähnliche Ereignisse aufzeichnen, lassen sich daraus die Massen und Drehimpulse der beteiligten Schwarzen Löcher abschätzen, und eine statistische Analyse könnte dann überprüfen, ob die Objekte möglicherweise primordialen Ursprungs sind.

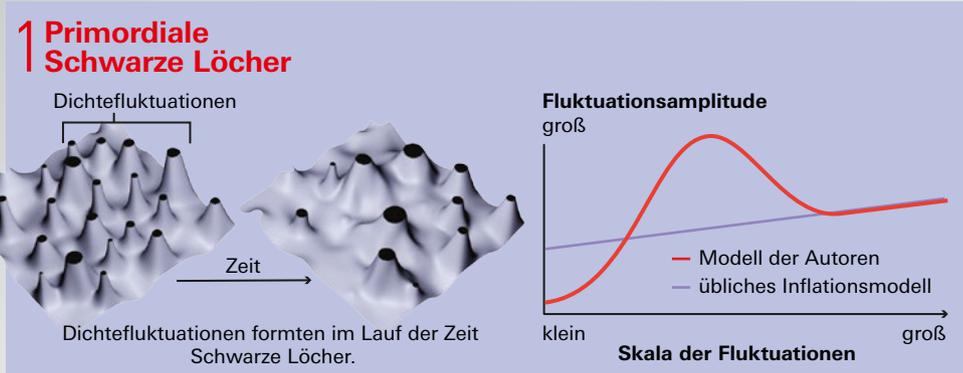
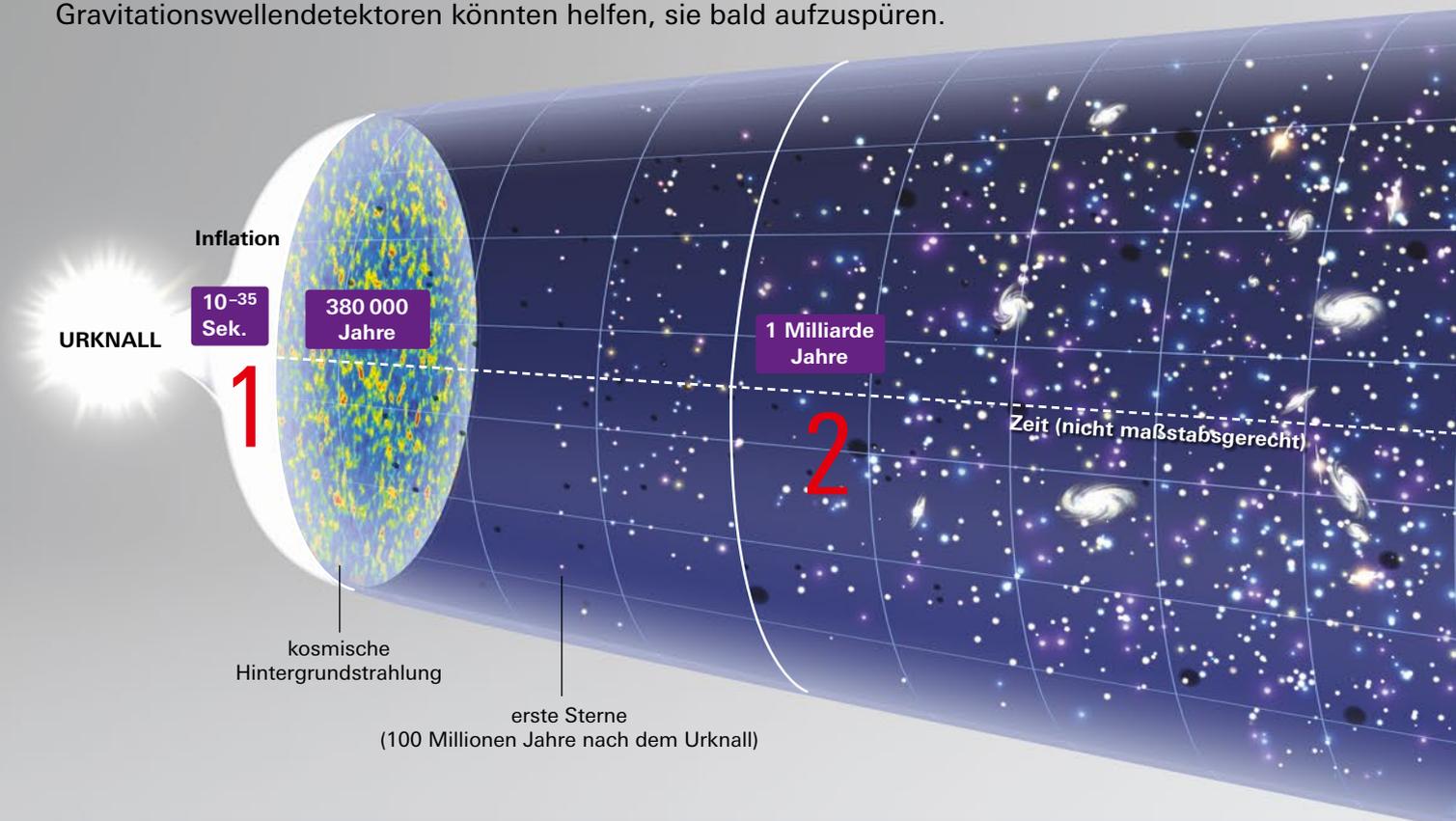
Dieses Szenario hat gegenüber der alten MACHO-Hypothese den großen Vorteil, dass es den beteiligten Massen keine Obergrenze auferlegt. MACHOs bis zu etwa zehn Sonnenmassen können dem beobachteten Mikrolinseneffekt zufolge nicht den Hauptteil der Dunklen Materie ausmachen. Hingegen besitzen primordiale Schwarze Löcher alle möglichen Massen, von denen sich nur ein Bruchteil durch den Mikrolinseneffekt bemerkbar macht, während der Großteil unsichtbar bleibt. Und wenn die primordialen Schwarzen Löcher Cluster bilden, beträgt die Wahrscheinlichkeit weniger als ein Promille, zufällig in der

AUF EINEN BLICK WORAUS BESTEHT DIE DUNKLE MATERIE?

- 1 Das Wesen des unsichtbaren Stoffs, der durch seine Schwerkraft die Galaxien zusammenhält, ist noch immer ein Rätsel.
- 2 Viele Forscher vermuten dahinter hypothetische, schwach wechselwirkende Masseteilchen. Die experimentelle Suche nach solchen Objekten blieb bisher allerdings vergeblich.
- 3 Eine andere Erklärung bieten – ebenfalls rein theoretisch – »primordiale« Schwarze Löcher vom Anbeginn des Kosmos. Gravitationswellen von deren Verschmelzung könnten nun Hinweise auf ihre Existenz liefern.

URTÜMLICHE PRODUKTE DES URKNALLS

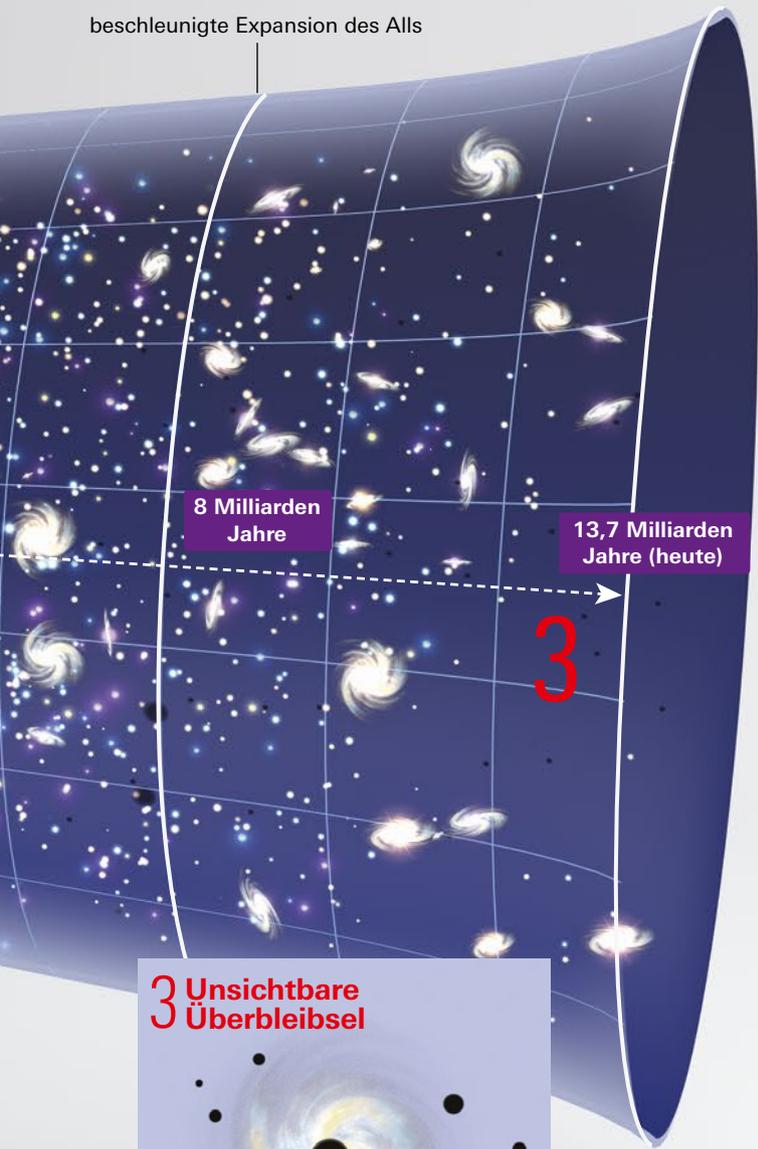
Schwarze Löcher sind vielleicht schon im ersten Sekundenbruchteil des Kosmos entstanden, als die Inflation – eine kurze Phase extremer Ausdehnung – subatomare Dichteschwankungen auf gigantische Ausmaße aufblähte. Solche »primordialen« Schwarzen Löcher hätten die späteren Strukturen im Universum nachhaltig geprägt. Sie wären heute Kandidaten für die mysteriöse Dunkle Materie. Moderne Gravitationswellendetektoren könnten helfen, sie bald aufzuspüren.



Die **kosmische Inflation** – eine explosive Ausdehnung des Universums unmittelbar nach dem Urknall – könnte winzige **Quantenfluktuationen** zu primordialen Schwarzen Löchern aufgebläht haben.

Das **Inflationsmodell** der Autoren (rot) postuliert, anders als die einfachere übliche Theorie (lila) einen breit gestreuten Bereich kleiner und großer **Dichtefluktuationen**, die zu Clustern von **primordialen Schwarzen Löchern** zwischen einem Hundertstel und dem 10000-Fachen der Sonnenmasse anwuchsen.

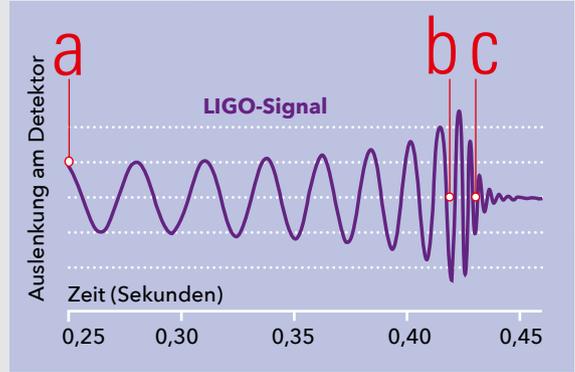
Die größten primordialen Schwarzen Löcher bildeten eine Milliarde Jahre nach dem Urknall Keimzellen für **supermassereiche Schwarze Löcher** und Galaxien.



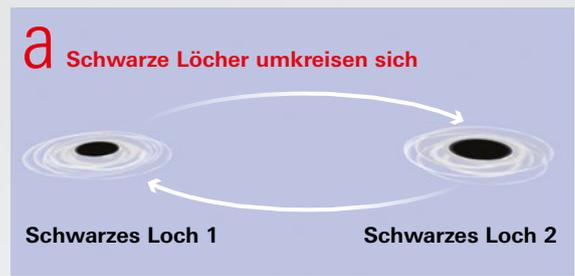
Die übrigen Schwarzen Löcher lauern heute unsichtbar als **Dunkle Materie** in Galaxien beziehungsweise als Halos um sie herum.

Künftige Indizien durch Gravitationswellen

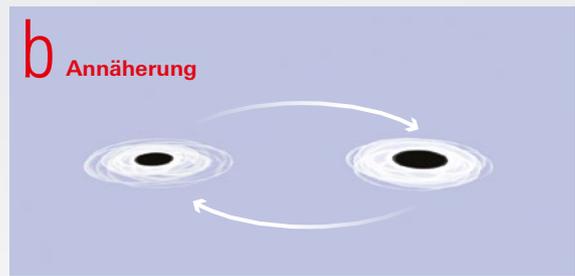
Detektoren wie das Advanced LIGO in den USA und Advanced Virgo in Italien dürften bald weitere Verschmelzungen Schwarzer Löcher aufspüren. Eine unerwartet große Anzahl solcher Ereignisse wäre ein Hinweis auf einen Ursprung aus der Anfangszeit des Alls.



Ein Gravitationswellendetektor misst die winzige Längenänderung zweier senkrecht aufeinanderstehender Arme eines Interferometers.



Wenn sich zwei Schwarze Löcher umeinanderdrehen, versetzt das die Raumzeit in regelmäßige Schwingungen – Gravitationswellen entstehen.



Während sich die Schwarzen Löcher immer enger und schneller umkreisen, steigt die Frequenz der Gravitationswellen.



Unmittelbar vor ihrer Verschmelzung erzeugen die Schwarzen Löcher die stärksten Gravitationswellen. Danach klingt das Signal rasch ab.

Künftige Indizien für primordiale Schwarze Löcher

1. Entdeckung weiterer Gravitationswellen.

Detektoren wie das Advanced LIGO in den USA und Advanced Virgo in Italien dürften immer mehr Verschmelzungen Schwarzer Löcher aufspüren. Eine unerwartet große Anzahl solcher Ereignisse wäre ein Indiz für deren primordialen Ursprung, aber noch kein Beweis dafür, dass die Dunkle Materie aus primordialen Schwarzen Löchern besteht. Erst die Entdeckung eines Schwarzen Lochs mit einer Masse unterhalb der »Chandrasekhar-Grenze« von 1,45 Sonnenmassen – kleinere Sterne können nicht zu einem Schwarzen Loch kollabieren – könnte belegen, dass das Objekt nicht stellarer Herkunft ist, sondern primordial sein muss. Das ständig verbesserte LIGO wird demnächst fähig sein, ein solches Schwarzes Loch zu entdecken, wenn dessen Partner mehr als zehn Sonnenmassen besitzt. In kosmologischem Maßstab müsste eine Vielzahl von Paaren Schwarzer Löcher zudem einen diffusen Hintergrund von Gravitationswellen erzeugen, den die künftige weltraumgestützte Laser Interferometer Space Antenna (LISA) sowie bodengestützte Pulsarermessanlagen nachweisen könnten.

2. Entdeckung weiterer leuchtschwacher

Zwerggalaxien. 2015 fanden Astronomen in den Daten des Dark Energy Survey Dutzende leuchtschwacher Zwerggalaxien im galaktischen Halo. Demnach dürften Hunderte solcher Objekte, die reich an Dunkler Materie sind, um die Milchstraße kreisen. Wenn die Dunkle Materie aus primordialen Schwarzen Löchern besteht, sollten die meisten von ihnen in solchen Zwerggalaxien stecken. Künftige weltraumgestützte Anlagen wie die Euclid-Mission der Europäischen Weltraumorganisation ESA und das Wide-Field Infrared Survey Telescope (WFIRST) der NASA werden vermutlich bald zahlreiche Zwerggalaxien finden.

3. Exakte Vermessung von Sternorten. Die derzeit laufende Gaia-Mission der ESA misst Ort und Geschwindigkeit von rund einer Milliarde Sternen mit nie da gewesener Genauigkeit. Winzige Abweichungen von der Bewegung benachbarter Sterne könnten auf zahlreiche massereiche Schwarze Löcher hinweisen.

4. Vermessung des neutralen kosmischen Wasserstoffs. Vor und während der Bildung der ersten Sterne bestand das Universum größtenteils aus neutralem Wasserstoff, der eine charakteristische Radiostrahlung von 21 Zentimeter Wellenlänge aussendet. Ab etwa 2020 wird das Square Kilometre Array (SKA), das größte je geplante Radioteleskop, den gesamten Himmel nach diesem Signal durchmustern. Die um primordiale Schwarze Löcher wirbelnde Materie erzeugt intensive Röntgenstrahlen, die den umgebenden neutralen Wasserstoff ionisieren und in der Himmelskarte der 21-Zentimeter-Strahlung charakteristische Spuren hinterlassen. Deshalb sollte SKA die Anwesenheit von massereichen primordialen Schwarzen Löchern entdecken, wenn die Dunkle Materie tatsächlich aus ihnen besteht.

5. Verzerrungen der kosmischen Hintergrundstrahlung. Die Röntgenstrahlung, die von primordialen Schwarzen Löchern ausgeht, während sie Gas und Staub verschlingen, sollte auch das Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung verzerren. Die Bedeutung des Effekts ist noch umstritten, insbesondere bei Modellen, in denen die primordialen Schwarzen Löcher dichte Cluster bilden. Dennoch wurde eine NASA-Mission namens Primordial Inflation Explorer (PIXIE) vorgeschlagen, die solche Verzerrungen genau vermessen soll. Das Ergebnis würde dem Modell der Autoren enge Grenzen setzen.

Sichtlinie der Sterne einer nach Mikrolinseneffekten durchmusterten Nachbargalaxie zu liegen.

Um mehr Daten zu bekommen, müsste man anderswo nach dem durch solche Phänomene vorübergehend verstärkten Licht von Sternen suchen – etwa in der Andromeda-Galaxie oder sogar bei weit entfernten Quasaren. Auf diese Weise würde ein viel größeres Volumen galaktischer Halos nach Anzeichen für primordiale Schwarze Löcher durchmustert. Laut neuen Beobachtungen könnten dunkle Objekte mit einem Zehntel bis hin zu wenigen Vielfachen der Sonnenmasse durchaus 20 Prozent der Masse eines typischen galaktischen Halos ausmachen. Somit spricht einiges dafür, dass die Dunkle Materie aus einer Vielfalt primordialer Schwarzer Löcher besteht. Zugleich würde dieses Szenario weitere kosmische Rätsel lösen, welche die Dunkle Materie und die Galaxienentstehung umgeben.

Cluster von primordialen Schwarzen Löchern könnten vor allem das so genannte Problem der fehlenden Begleiter aufklären – den anscheinenden Mangel an Zwerggalaxien, die sich um massereiche Galaxien wie unsere Milchstraße bilden müssten. Derzeit geben Simulationsmodelle für die kosmische Verteilung der Dunklen Materie zwar die großräumigen Strukturen des Universums richtig wieder: Halos aus Dunkler Materie bündeln die Galaxienhaufen zu riesigen Filamenten und Schichten, zwischen denen große Leerräume geringerer Dichte gähnen. Doch in kleinerem Maßstab sagen die Simulationen zahlreiche um die massereichen Galaxien kreisende Nebenhalos aus Dunkler Materie voraus. Jeder Nebenhalo sollte eine Zwerggalaxie beherbergen, und Hunderte davon müssten die Milchstraße umgeben. Die Astronomen finden aber viel weniger Zwerggalaxien als erwartet.

Eine mögliche Erklärung für das Problem der fehlenden Begleiter besagt, dass die Simulationen den Einfluss der gewöhnlichen Materie – im Wesentlichen des Wasserstoffs und des Heliums in Sternen – auf die Bildung und das Verhalten der Zwerggalaxien nicht richtig berücksichtigen. Wenn nun aber gemäß unserem Szenario die Dunkle Materie größtenteils aus Clustern von primordialen Schwarzen Löchern besteht, dann herrschen diese Schwarzen Löcher auch in den die Milchstraße umgebenden Nebenhalos vor, absorbieren dort einen Teil der gewöhnlichen Materie und hemmen die Bildung neuer Sterne.

Selbst wenn in den Nebenhalos viele Sterne entstünden, würden sie durch Begegnungen mit massereichen primordialen Schwarzen Löchern häufig hinausgeworfen. Beide Effekte würden die Helligkeit der Begleiter beträchtlich senken. Immerhin sind mit den empfindlichsten Kameras einige Dutzend äußerst schwacher Zwerggalaxien in der Nähe der Milchstraße entdeckt worden. Anscheinend enthalten diese Objekte 100-mal mehr Dunkle Materie als sichtbare Sterne, und unserem Modell zufolge kreisen weitere tausende unentdeckt um die Milchstraße.

Eine Antwort auf viele Fragen

Kosmologische Simulationen sagen nicht nur Zwerggalaxien und massereiche Galaxien voraus, sondern auch solche mittlerer Größe. Derartige Objekte gelten als »too big to fail« – sie sind groß genug, um bereitwillig Sterne zu bilden und leicht entdeckt zu werden. Dennoch durchsuchen Astronomen die Nachbarschaft der Milchstraße vergeblich nach ihnen. Die Lösung für das Too-big-to-fail-Problem ist die gleiche wie für das Rätsel der fehlenden Begleiter: Im Kern der mittelgroßen Galaxien verborgene massereiche primordiale Schwarze Löcher werfen Sterne und sternbildendes Gas aus diesen Galaxien hinaus und machen sie dadurch für die meisten Durchmusterungen praktisch unsichtbar.

Primordiale Schwarze Löcher könnten auch erklären, wie ihre supermassereichen großen Brüder entstehen. Diese Monster haben die millionen- bis milliardenfache Masse der Sonne und liegen vermutlich im Zentrum jeder großen Galaxie. Supermassereiche Schwarze Löcher können nicht einfach aus dem Gravitationskollaps der ersten Sterne im Universum hervorgegangen sein, denn dann hätten sie nicht in relativ kurzer Zeit – weniger als eine Milliarde Jahre nach dem Urknall – derart gigantische Massen erreicht.

In unserem Szenario haben zwar die meisten primordialen Schwarzen Löcher nur ein paar Dutzend Sonnenmassen, aber einige sind viel schwerer, mit mehreren Hundert bis zu Zehntausenden davon. Diese kaum eine Sekunde nach dem Urknall entstandenen Riesenobjekte wirkten als Keimzellen für die Bildung der ersten Galaxien und Quasare, und in deren Zentrum wiederum entwickelten sich rasch supermassereiche Schwarze Löcher. Solche Keime erklären auch die Existenz von mittelgroßen Schwarzen Löchern mit tausend bis zu einer Million Sonnenmassen, die um supermassereiche kreisen und im Zentrum von Kugelhaufen sitzen.

Alles in allem sind primordiale Schwarze Löcher vielleicht das gesuchte Zwischenglied zwischen gewöhnlichen stellaren und supermassereichen Schwarzen Löchern. Für das Szenario sprechen viele Beobachtungen der letzten Zeit. Die Entdeckung unerwartet häufiger Röntgenquellen im frühen Universum lässt sich am einfachsten durch große Mengen primordialer Schwarzer Löcher erklären, die knapp eine Milliarde Jahre nach dem Urknall Gas verschlangen und dabei Röntgenstrahlen aussandten.

Gravitationswellen als Boten der Dunklen Materie

Massereiche primordiale Schwarze Löcher würden auf einen Schlag das Rätsel der Dunklen Materie und weitere kosmologische Probleme lösen, aber erst die Zukunft wird zeigen, ob sie gegen andere Modelle und Erklärungen bestehen können. In den kommenden Jahren werden mehrere denkbare Tests das Konzept der primordialen Schwarzen Löcher auf die Probe stellen (siehe »Künftige Indizien für primordiale Schwarze Löcher«, links).

Vor allem besitzen wir nun mit Advanced LIGO und anderen Gravitationswellendetektoren völlig neue Instrumente zur Erforschung des Kosmos. Wenn LIGO tatsächlich Verschmelzungen aus einer ganzen Population massereicher primordialer Schwarzer Löcher entdeckt hat, dürfen wir bald viele weitere derartige Ereignisse erwarten. 2016 und 2017 vermeldeten die LIGO-Forscher neue Entdeckungen. Gravitationswellen sind etwa bei der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher mit 14 beziehungsweise 8 Sonnenmassen entstanden sowie bei einem Ereignis mit 30 und 20 Sonnenmassen. Weitere Kandidaten werden derzeit überprüft.

Nach diesen ersten Beobachtungen treten Paare von Schwarzen Löchern häufiger auf als erwartet, und sie besitzen höchst divers verteilte Massen. Das würde unser Szenario bestätigen, das die Dunkle Materie durch massereiche primordiale Schwarze Löcher erklärt. Warten wir es ab – erhellende Zeiten stehen bevor. ◀

QUELLEN

Bird, S. et al.: Did LIGO Detect Dark Matter?
In: Physical Review Letters 116, 201301, 2016

Clesse, S., García-Bellido, J.: Massive Primordial Black Holes from Hybrid Inflation as Dark Matter and the Seeds of Galaxies.
In: Physical Review D 92, 023542, 2015

Clesse, S., García-Bellido, J.: The Clustering of Massive Primordial Black Holes and Dark Matter: Measuring their Mass Distribution with Advanced LIGO. In: Physics of the Dark Universe 15, S. 142–147, 2017

García-Bellido, J. et al.: Density Perturbations and Black Hole Formation in Hybrid Inflation. In: Physical Review D 54, S. 6040–6058, 1996

Kashlinsky, A.: LIGO Gravitational Wave Detection, Primordial Black Holes, and the Near-IR Cosmic Infrared Background Anisotropies.
In: Astrophysical Journal Letters 823, L25, 2016

LITERATURTIPP

Dobrescu, B. A., Lincoln, D.: Der verborgene Kosmos.
In: Spektrum der Wissenschaft 11/2015, S. 42–49
Beschreibt zahlreiche Hypothesen für Dunkle Materie jenseits der WIMPs

INTERVIEW

»BALD WIRD ES ERST RICHTIG SPANNEND«

Der Physiker Karsten Danzmann und sein Team waren maßgeblich an der Entdeckung von Gravitationswellen im Jahr 2015 beteiligt. Ein Gespräch über kollidierende Schwarze Löcher, Einsteins Relativitätstheorie und die Astronomie der Zukunft.

» spektrum.de/artikel/1496893

Herr Professor Danzmann, hier in Ihrem Institut in Hannover hängt ein Poster, auf dem Albert Einstein seine Zunge herausstreckt. Darunter steht »Yes we can«. Man empfindet schon Genugtuung, wenn man der Natur ein großes Geheimnis abgerungen hat, oder?

Ja, das kann man wohl sagen. Als ich vor 28 Jahren in das Forschungsgebiet eingestiegen bin, galt die Suche nach Gravitationswellen als exotisches, obskures Randgebiet. Die Leute haben damals gesagt: »Das wird doch sowieso nichts.« Das Poster haben meine Mitarbeiter dann gedruckt, als wir vor zwei Jahren das Signal zweier kollidierender Schwarzer Löcher aufgespürt hatten – und dieses

genau so aussah, wie es Einsteins allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt.

Die Schwarzen Löcher haben bei ihrer Kollision die Raumzeit in Schwingung versetzt. Nachgewiesen haben Sie diese Gravitationswellen am 14. September 2015 mit Hilfe der zwei Laserinterferometer des LIGO-Observatoriums in den US-Bundesstaaten Louisiana und Washington. Wissen Sie noch, was Sie an dem Tag gemacht haben?

Für mich war das zunächst ein Montag wie jeder andere. Aber dann haben zwei Mitarbeiter unseres Instituts ge-



Wie sein Zwilling im US-Bundesstaat Washington besteht das LIGO-Interferometer in Livingston, Louisiana, aus zwei vier Kilometer langen Armen. Durch die Röhren flitzen Laserstrahlen, die am Ende der Strecke von Spiegeln reflektiert werden.



FRANK WINKEL / APF

Karsten Danzmann

ist Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover. Der 62-Jährige ist Experte für Laserinterferometrie und zählt weltweit zu den führenden Gravitationswellenforschern. Zunächst arbeitete er an der Stanford University und am Max-Planck-Institut für Quantenoptik, 1993 wurde er Professor an der Universität Hannover. Danzmann ist Mitglied der LIGO-Kollaboration sowie leitender Wissenschaftler des deutschen Gravitationswellendetektors GEO600 und der Satelliten-Testmission LISA Pathfinder.

gen 11.50 Uhr eine automatisch generierte E-Mail erhalten, dass LIGOs Detektoren ausgeschlagen haben. Amerika schlief zu dem Zeitpunkt noch, weshalb unser Team, das Teil der etwa 1000-köpfigen LIGO-Kollaboration ist, zuerst informiert wurde. Bald stand das halbe Institut bei den beiden im Büro und guckte ungläubig auf das Messsignal auf dem Bildschirm.

War sofort klar, dass Sie Gravitationswellen aufgefangen hatten?

Nein, überhaupt nicht. Das Signal wirkte zu schön, um wahr zu sein. Genau so sollten die Gravitationswellen kollidierender Schwarzer Löcher aussehen. Aber wenn Sie jahrzehntelang nach etwas suchen, schreien Sie nicht plötzlich »Heureka, wir haben es!«. Als Wissenschaftler empfindet man in so einer Situation zunächst Unglauben. Das Bewusstsein, dass gerade etwas Großes passiert ist, stellt sich im Kriechtempo ein. Bei mir hat es zwei Wochen gedauert, bis ich das realisiert hatte.

LIGO war in den fünf Jahren zuvor aufwändig modernisiert worden, am 14. September befanden Sie sich noch in einem Probelauf für »Advanced LIGO«. Da hätte es sich ja auch durchaus um ein Testsignal handeln können, oder?

Diesen Fall gab es während der Inbetriebnahme tatsächlich immer wieder. Aber das konnten wir schnell ausschließen, schließlich wachte irgendwann auch Amerika auf. Und da sagten alle Wissenschaftler, die ein Testsignal in die Detektorsoftware einspeisen können, dass sie es nicht waren. Generell verstehen weniger als zehn Forscher auf der Welt die LIGO-Interferometer so gut, dass sie ein solches Signal fabrizieren könnten. Letztlich haben wir mehrere Monate gebraucht, bis wir alle anderen Erklärungen ausschließen konnten und uns hundertprozentig sicher waren.

Gravitationswellen stauchen die vier Kilometer, über die sich ein Arm des LIGO-Interferometers erstreckt, gerade mal um den Bruchteil eines Atomkerndurchmessers. Meinen Sie, Einstein konnte sich so eine Messung vorstellen?

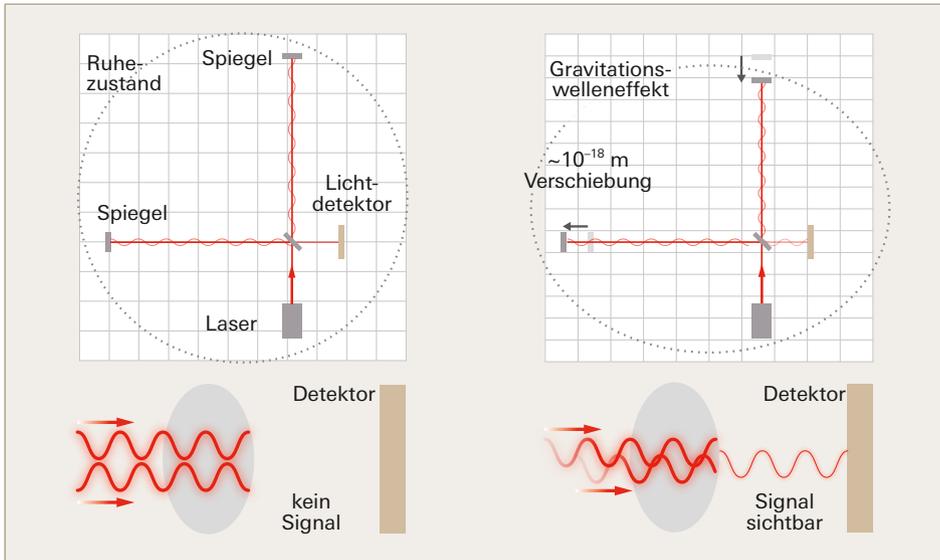
Er hat nie daran geglaubt, dass man Gravitationswellen nachweisen wird. Aus seinen Veröffentlichungen und Briefen wird sogar deutlich, dass er mindestens fünfmal in seinem Leben seine Meinung dazu geändert hat, ob es Gravitationswellen überhaupt gibt. Zeitweise dachte er, dass dies nur mathematische Artefakte der Linearisierung der Feldgleichungen der Relativitätstheorie seien, die keinerlei physikalische Bedeutung haben.

Wieso haben Wissenschaftler dann doch eines Tages die Jagd aufgenommen?

Sie haben erkannt, dass es im Weltall Neutronensterne und Schwarze Löcher gibt, die mit Abstand stärksten Quellen für Gravitationswellen. Zu Einsteins Zeiten waren diese Objekte noch unbekannt. In den 1950er Jahren haben theoretische Physiker außerdem gezeigt, dass Gravitationswellen als Schwingungen der Raumzeit Energie transportieren und diese auch zu einem kleinen Teil in einem Detektor deponieren können. Das ist die Voraussetzung dafür, dass sie nachweisbar sind.

Trotzdem blieb die Gravitationswellenforschung lange eine Nischendisziplin. Wie kamen Sie Ende der 1980er Jahre dazu, sich daran zu beteiligen?

Ich hatte schon immer eine Vorliebe für exotische Sachen. Damals habe ich mich mit Laserspektroskopie an Positronium (*Anm. d. Redaktion:* ein extrem kurzlebiger Zusammenschluss eines Elektrons und seines positiv geladenen Antiteilchens) befasst und auf einer Konferenz in Bretton Woods Ergebnisse vorgestellt. Unter den Zuhörern saß der spätere



Gravitationswellendetektoren arbeiten nach dem Prinzip eines Michelson-Interferometers: Zwei Laserstrahlen laufen senkrecht zueinander zwei Messarme entlang und werden an deren Enden von Spiegeln reflektiert. Zurück am Ausgangspunkt überlagern sich die beiden Strahlen und ergeben ein Signal bestimmter Helligkeit. Passiert eine Gravitationswelle den Detektor, staucht und dehnt sie den Raum im Interferometer. Die Laserstrahlen treffen dann in einer anderen Phase aufeinander, wodurch sich die Helligkeit des Ausgangssignals ändert.

Vizepräsident der Max-Planck-Gesellschaft. Nach dem Vortrag kam er zu mir und sagte: »Herr Danzmann, Sie kommen nach München und machen dort Gravitationswellenforschung.« Vier Monate später habe ich angefangen.

Wie groß war denn allgemein der deutsche Beitrag an der Entdeckung der Gravitationswellen?

Heinz Billing, mein Vorgänger in der Max-Planck-Gesellschaft, gehörte weltweit zu den Pionieren. Er wäre sicher für den Nobelpreis in Frage gekommen, ist aber leider im Januar 2017 verstorben. Seine Gruppe hat bis Ende der 1980er Jahre alle Empfindlichkeitsrekorde in der Laserinterferometrie gehalten. Damals arbeitete man allerdings noch mit vergleichsweise kleinen Interferometern, die allenfalls einige Dutzend Meter groß waren – und daher keine Chance hatten, die Erschütterungen der Raumzeit nachzuweisen. Das waren aber letztlich essenzielle Vorarbeiten für LIGO.

Wieso ist das Riesen-Interferometer dann nicht in Deutschland gebaut worden?

Uns kam die Wiedervereinigung dazwischen. Danach fehlte für viele Jahre auf Bundesebene das Geld für Großprojekte in der Grundlagenforschung. Wir haben 1995 mit dem Land Niedersachsen, der Volkswagenstiftung und der Max-Planck-Gesellschaft in Ruthe bei Hannover immerhin den 600 Meter langen Gravitationswellendetektor GEO600 gebaut. Er dient vor allem dazu, Technologie zu testen. Eigentlich alles, was wir in Hannover entwickelt haben, kommt heute in Advanced LIGO zum Einsatz.

Wie sicher waren Sie und Ihre Kollegen im Vorfeld der Inbetriebnahme, dass man mit dem Instrument tatsächlich Gravitationswellen auffangen würde?

Es war klar, dass wir die Wellen irgendwann finden würden. Aber wann, das konnte niemand wissen. Uns hat vor allem überrascht, dass es so schnell ging. Insgesamt hatten wir großes Glück: Advanced LIGO hatte im September 2015 erst ein Drittel seiner angepeilten Empfind-

lichkeit erreicht. Und dann trafen wenige Tage, nachdem wir den Detektor angeschaltet hatten, enorm starke Gravitationswellen die Erde. Mit solch einem Signal hatten wir auch deshalb nicht gerechnet, weil wir die zugehörigen Quellen nicht kannten.

Aber Schwarze Löcher sind doch seit Jahrzehnten bekannt.

Ja, das schon. Die Gravitationswellen vom 14. September gingen allerdings auf die Kollisionen zweier gigantischer Exemplare zurück, deren Masse wir auf das 36- beziehungsweise 29-Fache unserer Sonne schätzen. Solche ungeheuren Objekte dürfte es gemäß der Standardtheorie der Sternentwicklung eigentlich gar nicht geben.

Wieso nicht?

Nach dem, was wir sicher über den Kollaps schwerer Sterne wissen, entstehen dabei vermutlich keine Schwarzen Löcher mit einer Masse von mehr als 15 Sonnenmassen. Alle stellaren Schwarzen Löcher, die Astronomen vor der Inbetriebnahme von Advanced LIGO mit Teleskopen entdeckt haben, sind leichter. Denn sobald ein Stern so massiv ist, dass er am Ende seiner Lebenszeit ein derartiges Monstrum hervorbringen könnte, kollabiert er nicht. Stattdessen explodiert er, bevor die Materie unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenstürzt.

Wie sind LIGOs Schwarze Löcher dann entstanden?

Da gibt es verschiedene Möglichkeiten, die auch heiß diskutiert werden. Vielleicht gibt es im All sehr dichte Sterncluster, in denen kleinere Schwarze Löcher häufig verschmelzen – und so Objekte mit den von uns beobachteten Massen bilden. Oder es existieren noch irgendwo Taschen mit ursprünglicher Materie, die direkt nach dem Urknall entstanden ist. Sterne in diesen Regionen würden nur aus Wasserstoff und Helium bestehen. Sie könnten – anders als später entstandene Sterne, in denen es auch schwerere Elemente gibt – in sich zusammenfallen und in einem sehr massiven Schwarzen Loch enden.

Die Autoren unserer Titelgeschichte (siehe S. 12) machen sich für Dichteschwankungen während der Inflationsphase nach dem Urknall stark, aus denen solche primordialen Schwarzen Löcher hervorgegangen sein könnten. Was halten Sie für die wahrscheinlichste Erklärung?

Ich will da lieber nicht spekulieren. Ich kann Ihnen aber sagen, was die Konsequenzen wären, wenn weitere Messungen mit LIGO zeigen sollten, dass Schwarze Löcher von diesem Format sehr häufig im Universum vorkommen: Dann könnten sie die Dunkle Materie erklären.

Dann müssten Schwarze Löcher vom Format der LIGO-Entdeckungen an vielen Orten im All auftauchen, oder? Wir dachten eigentlich, dass Astronomen in den vergangenen Jahrzehnten gezielt nach solchen Objekten (so genannten MACHOs) gesucht haben, aber nichts finden konnten.

Klar, es kann sein, dass die Theorie von den primordialen Schwarzen Löchern nicht mehr ist als wüste Spekulation. Letztlich müssen wir auf mehr Messdaten warten. Wir haben neben der Gravitationswelle im September 2015 ja noch zwei weitere Signale nachgewiesen. Auf Basis dieser Daten schätzen wir, dass pro Jahr zwischen 9 und 250 Schwarze Löcher in einem Würfel von 3,2 Milliarden Lichtjahren Kantenlänge rund um die Erde verschmelzen. Wenn die Rate in den kommenden Jahren so hoch bleiben sollte, wird es spannend.

Was erhoffen Sie sich noch zu finden?

Einerseits die Gravitationswellen verschmelzender Neutronensterne, und eventuell die von Paaren aus Neutronenstern und Schwarzen Loch. Vielleicht können wir auch einem einzelnen Neutronenstern beim Rotieren zuhören und so Neues über diese bizarren Objekte lernen. Der Crab-Pulsar im Inneren des Krebsnebels könnte hierfür nah genug sein – dort ist einst ein Stern explodiert, dessen Licht die Erde im Jahr 1054 erreicht hat.

Meinen Sie, dass irgendetwas auftaucht, was Einsteins Theorie von der Schwerkraft widerspricht?

Die Daten werden natürlich daraufhin analysiert. Aber bisher gibt es keine Abweichungen von der allgemeinen Relativitätstheorie. Andererseits sind unsere Messungen dafür noch nicht genau genug. Wir brauchen noch eine Weile, bis wir zu den spannenden Tests kommen.

Was wird sich denn verändern, wenn weitere Gravitationswellendetektoren in Betrieb gehen? In Italien steht Advanced VIRGO in den Startlöchern, und auch in Indien und Japan sind entsprechende Projekte in Planung.

Sobald drei Detektoren ins All horchen, können wir vielleicht den Ursprungsort von Gravitationswellen genauer orten. Bislang sind wir nur in der Lage, den Abstand von der Erde relativ gut zu berechnen. Bei VIRGO kam es leider zu Verzögerungen wegen eines Problems mit den Spiegelabhängungen im Detektor, weshalb dieser nun zunächst mit deutlich reduzierter Sensitivität den Betrieb aufgenommen

men hat. Die Kollegen haben viel Pech gehabt. Aber hoffentlich sind sie in einem Jahr voll einsatzbereit.

Langfristig wollen Sie auch vom Weltall aus Gravitationswellen messen, mit dem Satellitentrio LISA.

Ja, das würde ein völlig neues Fenster öffnen. Die LIGO-Detektoren sind für Wellen mit einer Frequenz von einigen Dutzend bis einigen tausend Hertz optimiert. Wir können Quellen dieser Strahlung bis in eine Entfernung von mehreren Milliarden Lichtjahren nachweisen. Mit LISA werden wir noch viel tiefer ins All horchen können und insbesondere nach tieferen Frequenzen im Millihertz-Bereich suchen. Vielleicht weisen wir auf diese Weise die Gravitationswellen des Urknalls nach, die als eine Art Hintergrundrauschen das ganze Weltall füllen müssten. Wenn das gelingt, ließen sich manche Varianten der Inflationstheorie überprüfen, die besonders starke Gravitationswellen erzeugen würden.

Wie läuft es mit den Vorbereitungen für LISA?

Wir haben unsere Testmission »LISA Pathfinder« bereits erfolgreich abgeschlossen. Mit diesem Satelliten haben wir getestet, ob es möglich ist, eine Masse so frei von allen Störungen zu halten, dass sie perfekt einer geodätischen Linie nach Einstein folgt, also nahezu kräftefrei durchs Weltall treibt. Das ist eine Voraussetzung für LISA: Das Projekt sieht letztlich jeweils zwei Massen auf drei verschiedenen Satelliten vor, die in einem Abstand von 2,5 Millionen Kilometern via Laserstrahl miteinander verbunden sind. Eine Gravitationswelle würde den Abstand zwischen den Satelliten minimal verändern.

Momentan ist LISA für das Jahr 2034 geplant.

Wieso die lange Wartezeit?

Am liebsten würden wir natürlich gleich morgen ins All starten, technisch machbar wäre wohl Ende der 2020er Jahre. Aber so einfach ist das nicht. Schließlich hat die ESA nicht so viele Startslots für große Weltraummissionen – und die Kollegen aus der Röntgenastronomie, die für ihr Teleskop einen früheren Starttermin ergatterten konnten, würden wohl nicht einsehen, wieso sie plötzlich zurückstehen müssen. Wenn in den nächsten Jahren mehr Geld in die Erforschung des Weltalls fließen sollte, kann sich der Starttermin noch ändern. Allerdings sieht es momentan nicht danach aus.

Bevor die erste Gravitationswelle nachgewiesen wurde, haben Sie geklagt, Ihre Forschungsdisziplin spiele immer nur die zweite Geige. Das hat sich mittlerweile sicher geändert, oder?

Ja, wir sind jetzt Teil des Mainstreams. Die Leute hören mir und meinen Kollegen mehr zu als früher. Das heißt aber noch lange nicht, dass sich plötzlich neue Geldtöpfe auftun. Allerdings haben wir jetzt Messdaten, mit denen wir arbeiten können, und nicht mehr nur die Hoffnung auf ein Signal. Man könnte auch sagen: Wir sind nun ein fester Bestandteil der Astronomie. ◀

Die Fragen stellten **Spektrum**-Praktikantin **Manon Bischoff** und **Spektrum**-Redakteur **Robert Gast**.

PALÄOGENETIK FRÜHER BESUCH BEI DEN NEANDERTALERN

Lange vor seiner großen Einwanderungswelle aus Afrika muss der *Homo sapiens* schon einmal in Eurasien aufgetaucht sein. Im Genom der Neandertaler hinterließ er eine deutliche genetische Spur: genau gesagt in ihren Mitochondrien.

Ein Teil der Geschichte ist bekannt: Vor rund 50 000 Jahren kam der anatomisch moderne Mensch aus seiner Heimat Afrika nach Eurasien, traf auf den Neandertaler und tauschte mit ihm Gene aus. Das geschah vermutlich in Nahost. Und während *Homo sapiens* sich anschickte, die Welt zu beherrschen, verschwand der Neandertaler von der Bildfläche. Nur manche seiner Gene leben bis heute weiter, in winzigen Dosen verstreut über das Erbgut der Europäer und Asiaten.

Allerdings begegneten sich die beiden Menschenformen damals wohl nicht zum ersten Mal. Dem Aufeinandertreffen am Ende der Neandertaler-Epoche ging anscheinend ein viel früherer Kontakt voraus, der irgendwann

zwischen vor 470 000 und 220 000 Jahren stattfand. Derzeit dürften Angehörige des frühen *Homo sapiens*, also noch nicht des modernen Menschen, den Weg aus Afrika genommen haben. Diese Wanderung verebte jedoch, soweit bekannt, ohne Spuren zu hinterlassen – außer im Neandertaler selbst.

Um jene Anhaltspunkte zu entdecken, muss man tief in genetische Details dieses Frühmenschen eintauchen, so wie jetzt ein internationales Forscherteam um Cosimo Posth und Johannes Krause, die an der Universität Tübingen und am Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in Jena arbeiten. In einem 125 000 Jahre alten Ober-schenkelknochen fanden sie Hinweise darauf, dass die so genannte Mitochondrien-DNA der klassischen europäischen Neandertaler praktisch komplett von besagten frühen Einwanderern aus dem Süden stammte. Das Fossil wurde schon 1937 in der Hohlenstein-Stadel-Höhle auf der Schwäbischen Alb geborgen.

Nicht nur der Zellkern enthält Erbgut. Auch in den Mitochondrien, den Zellkraftwerken, steckt etwas davon, und diese besondere mtDNA wird in aller Regel nur von der Mutter mit dem Ei an den Nachwuchs quasi unverändert weitergegeben. Das bedeutet, die Mitochondrien-DNA vermag zwar wie alle Erbgutsequenzen langsam zu mutieren, wird aber bei der Fortpflanzung nicht mit derje-

Querschläger im Stammbaum

Vor einigen hunderttausend Jahren haben die Neandertaler beziehungsweise nahe Vorfahren ihre Mitochondrien gegen welche vom frühen *Homo sapiens* ausgetauscht. Die breiten Balken zeigen die Abstammungslinien laut Zellkern-DNA von Neandertalern, Denisova-

nern und dem *Homo sapiens*. Die schmalen, farbigen Bänder verdeutlichen auf die Herkunft der Mitochondrien – Zellorganellen für den Energiehaushalt mit eigener DNA. Die Denisovaner, auf deren genetische Spur Forscher bei Fossilien aus dem Altaigebirge stießen,

behielten ihre Mitochondrien bei, ebenso noch Frühmenschen in Spanien aus der berühmten »Knochenhöhle«. Doch die späten Neandertaler besaßen Mitochondrien, die sie nachträglich vom *Homo sapiens* übernommen haben müssen.

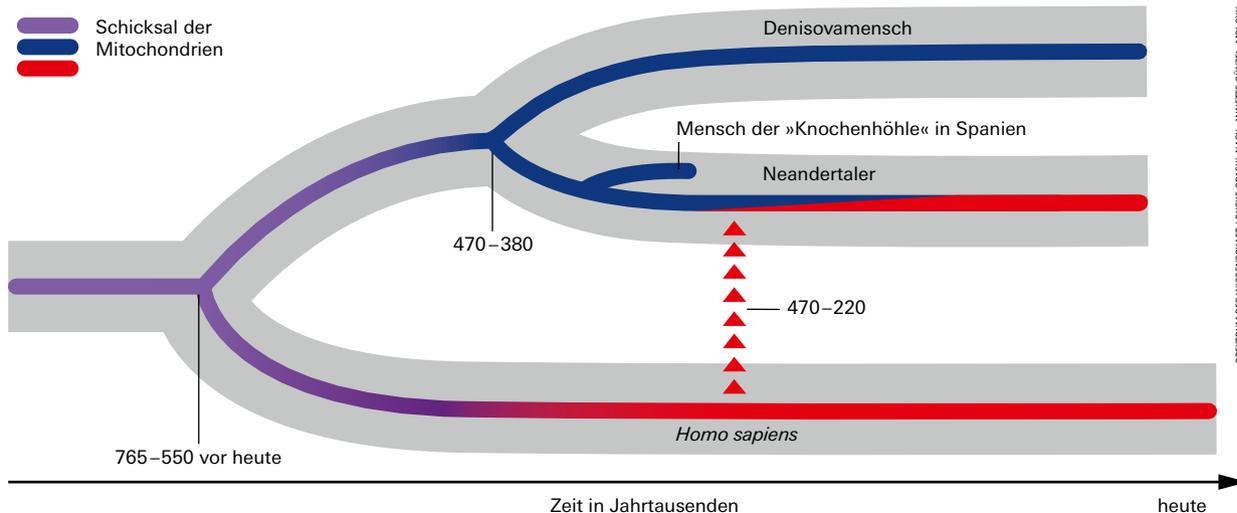




FOTO: OLEG KUCHAR © PHOTO MUSEUM ULM

nigen anderer – väterlicher – Zellen durchmischt und bleibt daher über alle folgenden Generationen im Wesentlichen gleich, und die Abstammung ist gut erkennbar. Mehr noch: Wegen dieses typischen Vererbungsmusters kommt es häufig dazu, dass nach einiger Zeit die meisten Mitglieder einer Population die gleiche mtDNA besitzen, fast alle also letztlich die gleichen Mitochondrien haben.

Genau das war anscheinend bei den europäischen Neandertalern der Fall. Bei ihnen hatte sich offenbar die mitochondriale DNA eines frühen *Homo sapiens* eingeschlichen und schließlich durchgesetzt. Vielleicht war das nur Zufall, vielleicht boten ihnen diese Gene aber auch gewisse Überlebensvorteile. Denn im Kontrast dazu steht der Befund, dass die neue Menschenform aus Afrika wohl keine bleibenden Spuren im Zellkerngenom der Neandertaler hinterließ. Zellkerngene des frühen *Homo sapiens* im Genpool der europäischen Neandertaler wären also nach der Einkreuzung wieder verschwunden, während die fremden Mitochondrien zurückblieben.

Durch die DNA von der Alb bekommen die widersprüchlichen Stammbäume einen Sinn

Laut Posth und seinen Kollegen könnte ihre Studie einen bisher rätselhaften genetischen Widerspruch bei der Ermittlung der Verwandtschaft zwischen Neandertaler und *Homo sapiens* klären. Das Paradox hatte sich erst in den letzten Jahren aufgetan, als Paläogenetiker immer mehr Daten zum Erbgut verschiedener Frühmenschen gewannen. Wie die Wissenschaftler nämlich verblüfft erkannten, erhält man für die frühen Eurasier abweichende Stammbäume, je nachdem ob man die DNA des Zellkerns vergleicht oder die der Mitochondrien. Die Kern-DNA besagt, dass sich die Linien von modernem Menschen und Neandertaler schon vor mindestens 550 000 Jahren voneinander getrennt haben müssen, eher sogar etwa 100 000 Jahre früher. Nach der Mitochondrien-DNA geschah die Aufspaltung erst vor frühestens 470 000 Jahren. Die große Diskrepanz ließe sich nur dann begreifen, wenn jene

mtDNA nachträglich zu den Neandertalern gekommen wäre. Die große Frage war jedoch, wann die beiden Menschenlinien wohl aufeinandergestoßen sind.

Darüber gibt die neue Studie nun Aufschluss. Den Paläogenetikern war es bisher lediglich gelungen, mtDNA relativ später europäischer Neandertaler zu sequenzieren. Das Fossil aus der Hohlenstein-Stadel-Höhle ist mit Abstand das bisher älteste dieser Menschenform, für das sie mitochondriale Erbgutsequenzen bestimmt haben. Wie die aktuelle Untersuchung erwies, besaß dieser Frühmensch von der Schwäbischen Alb, der vor rund 120 000 Jahren lebte, bereits die »neuen« Mitochondrien. Allerdings spricht seine mtDNA für eine recht weit zurückliegende Abspaltung seiner Vorfahren von der Linie, die zu den späten Neandertalern führte. Die Trennung wäre nach den Analysen vor mindestens 220 000 Jahren und wohl eher nahe an 400 000 Jahren anzusetzen. Das dürfte demnach etwa die Zeitspanne sein, in der Vertreter des frühen *Homo sapiens* Erbgut nach Europa brachten – wenigstens 200 000 bis 300 000 Jahre vor der großen Einwanderungswelle anatomisch moderner Menschen.

Noch eine weitere Erkenntnis ziehen die Forscher aus der mtDNA des Neandertalerknochens von der Hohlenstein-Stadel-Höhle: Die eigenständige Entwicklung dieser Linie über Jahrzehntausende und der Vergleich mit Erbgutsequenzen anderer Neandertaler zeugt davon, dass ihre genetische Vielfalt über lange Zeitabschnitte größer und die Zahl der Individuen höher war, als ihre viel besser untersuchte Endphase glauben macht. Genaueres könnte die Zellkern-DNA aus dem Oberschenkelknochen liefern. Doch leider ist es den Forschern noch nicht gelungen, ausreichend Sequenzen für eine Analyse zu isolieren.

Jan Dönges ist Redakteur bei **Spektrum.de** in Heidelberg.

QUELLE

Posth, C. et al.: Deeply Divergent Archaic Mitochondrial Genome Provides Lower Time Boundary for African Gene Flow into Neanderthals. In: Nature Communications 8, 16046, 2017

BILDGEBUNG EINBLICK INS INNERE EINES MAGNETEN

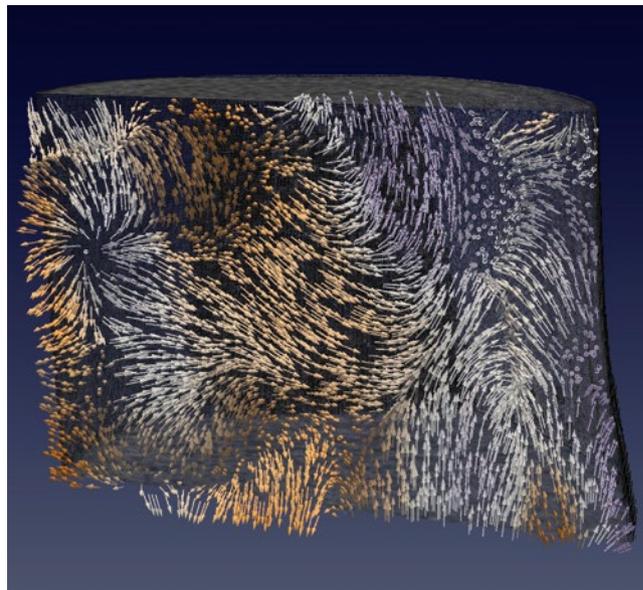
Mit einer neuen Technik zeigen Forscher die dreidimensionale Anordnung der Spins innerhalb eines Festkörpers. Die Methode könnte zum besseren Verständnis magnetischer Werkstoffe beitragen und den Weg zu leistungsfähigeren Datenspeichern weisen.

Die magnetischen Eigenschaften eines Materials sind entscheidend für zahlreiche technische Anwendungen, insbesondere für Speichermedien. Sie hängen von den Spins der enthaltenen Elektronen ab, also ihren quantenmechanischen Drehmomenten. Deren Wechselwirkungen sind allerdings kompliziert: Der Spin ist ein Vektor und hat somit anders als beispielsweise die Ladung nicht nur einen Betrag, sondern zugleich eine Richtung. Das verursacht auf mikroskopischer Ebene verschiedenste Effekte. Sie zu verstehen und Anordnungen von Spins möglichst genau zu untersuchen, ist von immenser wissenschaftlicher und technologischer Bedeutung. Nun hat die Physikerin Claire Donnelly gemeinsam mit ihren Kollegen vom schweizerischen Paul Scherrer Institut gezeigt, wie eine spezielle Methode der Röntgenmikroskopie solche Einblicke ermöglichen könnte.

Heutige Datenspeicher basieren auf Effekten, die sich auf der Oberfläche dünner magnetischer Schichten abspielen. Doch infolge der Miniaturisierung bei gleichzeitig stetig wachsenden Datenmengen nimmt die Notwendigkeit zu, den Platz in Trägermedien möglichst optimal zu nutzen – und dazu gehört ein immer tieferes Vordringen in ihre dritte Dimension. Der Vektorcharakter von Spins macht deren räumliches Verhalten wesentlich schwieriger berechenbar als das von einfachen Ladungsträgern. Vermutlich warten darum im Bereich magnetischer 3-D-Bauteile viele einzigartige Materialeigenschaften mit ganz neuen potenziellen Einsatzmöglichkeiten auf ihre Entdeckung.

Dabei könnte polarisiertes Röntgenlicht eine zentrale Rolle spielen. Es hat eine genau festgelegte Schwingungsrichtung und eignet sich gut dazu, die Eigenschaften magnetischer Materialien zu untersuchen: Die Polarisierung führt abhängig von der Ausrichtung des jeweiligen Spins zu charakteristischen Wechselwirkungen. Röntgenstrahlung durchdringt darüber hinaus selbst mikrometerdicke Proben sehr gut und ermöglicht durch ihre kleine Wellenlänge eine hohe potenzielle Auflösung – die prinzipielle Grenze für die Bildgebung liegt bei Bruchteilen von Nanometern.

Im Lauf des letzten Jahrzehnts gelangen Forschern so zweidimensionale Aufnahmen mit einer Auflösung von rund zehn Nanometern. Computerprogramme setzen viele Bilder aus unterschiedlichen Winkeln sogar zu dreidimensionalen Ansichten zusammen. Diese Tomografie genannte Technik findet bereits breite Anwendung in der Biologie und Materialwissenschaft.



PAUL SCHERRER INSTITUT / CLAIRE DONNELLY

Ein virtueller senkrechter Schnitt durch den fünf Mikrometer dicken Metallzylinder zeigt die Ausrichtung der magnetischen Momente in der Ebene.

Analog zu optischen Lasern ist eine entscheidende Eigenschaft von Röntgenlasern ihre Kohärenz, das heißt ein gleich bleibender Abstand zwischen den Wellenbergen und -tälern im Licht des Strahls. Dank ihr lassen sich mit Computeralgorithmen kleinste Details der untersuchten Proben aus den Detektorbildern berechnen. In jüngster Zeit konzentrieren sich immer mehr Forscher auf hoch entwickelte Verfahren, die aus den Aufnahmen möglichst viele Daten über die gestreuten Photonen gewinnen. Damit wollen sie der prinzipiellen Auflösungsgrenze im Nanometerbereich noch näher kommen. Zu den nutzbaren Informationen gehört nicht nur die direkt am Detektor messbare Intensität, sondern auch die unsichtbare und nur indirekt zugängliche Phase der Lichtwelle, das heißt ihre wechselnde Auslenkung an verschiedenen Punkten in der Probe. Sie muss nachträglich schrittweise aus vielen Bildern rekonstruiert werden. Das ist nur möglich, weil die Einzelaufnahmen durch die Kohärenz miteinander zusammenhängen. Sie lassen gemeinsam umso bessere Rückschlüsse auf die innere Struktur des Objekts zu, je mehr von ihnen es gibt.

Ein Computerprogramm errechnet aus zahlreichen Beugungsmustern eine 3-D-Karte der Spins

Der Ansatz von Donnelly und ihren Kollegen basiert auf einer solchen iterativen Technik, der »Ptychografie«. Die Forscher untersuchten einen zylinderförmigen, fünf Mikrometer dicken Magneten aus einer Gadolinium-Kobalt-Legierung. Dazu schossen sie durch ihn einen Strahl polarisierter Röntgenstrahlung hindurch und zeichneten das Beugungsmuster mit einem dahinterliegenden Detektor auf. Die Wissenschaftler führten Messungen an vielen überlappenden Stellen der Probe durch und drehten diese

dabei. Anschließend kippten sie den Zylinder um 30 Grad und wiederholten die Prozedur. Danach fütterten sie ein Computerprogramm mit den riesigen Datenmengen. Es gelang ihnen, das dreidimensionale Netzwerk der Spins im Magneten mit einer Auflösung von rund 100 Nanometern zu rekonstruieren.

Diese Trennschärfe ist damit zwar noch nicht so gut wie bei herkömmlichen Strukturanalysen mit Röntgenstrahlung, hat aber großes Potenzial, rasch bis zur fundamentalen Auflösungsgrenze vorzustoßen. Übliche Techniken hingegen benötigen spezielle Röntgenlinsen und weitere optische Elemente, die den Versuchsaufbau kompliziert und nur mühsam optimierbar machen. Ptychografie kommt weitgehend ohne derartige Bauteile aus. In anderen Experimenten, die allerdings noch nicht die Magnetisierung untersuchten, haben Forscher bereits 2014 Auflösungen im Bereich weniger Nanometer erreicht. Im Frühjahr 2017 gelang Physikern mit Ptychografie eine dreidimensionale, 15 Nanometer feine Darstellung von Schaltkreisen auf einem Chip.

Das macht deutlich, wie viel Potenzial in der Methode von Donnelly und ihren Kollegen steckt. Die Arbeit ist somit ein wichtiger Meilenstein bei der Untersuchung magnetischer Materialien. Um von nachhaltigem Nutzen zu sein, muss die Technik mit der industriellen Entwicklung Schritt halten – einige magnetische Nanostrukturen

sind schon jetzt kleiner als selbst die besten bislang mit Ptychografie erreichten Auflösungen.

Andere Verfahren wie die Elektronenmikroskopie bieten höhere Auflösungen, teilweise sogar bis in den Bereich einzelner Atome, doch sie eignen sich praktisch nur für Oberflächen und dünne Schichten. Ein entscheidender Vorteil der Röntgenmikroskopie ist, dass man mit ihr auch die inneren Lagen dickerer Bauteile untersuchen kann. Insbesondere sind die Grenzbereiche zwischen verschiedenen Materialien interessant, da hier starke Wechselwirkungen der Spins auftreten, die zudem gegenüber störenden äußeren Einflüssen besser geschützt sind. Derart robuste Ordnungen könnten sich für kompakte und energieeffiziente Speicher nutzen lassen. Die einstmals utopische Aussicht, einzelne Spins dabei zu beobachten, wie sie sich in den Tiefen eines Bauteils neu orientieren, rückt dank der Röntgenmikroskopie ein gutes Stück näher. ◀

Mike Beckers ist Physiker und Redakteur bei **Spektrum**.

QUELLE

Donnelly, C. et al.: Three-Dimensional Magnetization Structures Revealed with X-Ray Vector Nanotomography. In: Nature 547, S. 328–331, 2017

Fischer, P.: Imaging Techniques: X-rays Used to Watch Spins in 3D. In: Nature 547, S. 290–291, 2017

ANZEIGE

FALLING WALLS BERLIN 2017 8/9 NOVEMBER

THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUTURE
BREAKTHROUGHS IN SCIENCE AND SOCIETY

CELEBRATING FREEDOM
COMMEMORATING PERSECUTION
SHARING KNOWLEDGE

**JETZT
ANMELDEN!**
www.
falling-walls.com/
registration

**“INVALUABLE
EXPERIENCES.”**

NATURE



Robert Bosch Stiftung

Brain City | **berlin**

Science
MVAAS

BASF
The Chemical Company



DAAD

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

ELSEVIER



nature

SCIENTIFIC
AMERICAN

Spektrum
der Wissenschaft | VERLAG

SPRINGER NATURE



pektrum der Wissenschaft 10.17 27



SIEMENS

in Zusammenarbeit mit
DIE ZEIT
VERLAGSGRUPPE

SPRACHEVOLUTION DAS VERBORGENE SPRACHTALENT DER AFFEN

Ihre anatomischen Voraussetzungen für bestimmte Sprachlaute sind günstiger als gedacht.

Florida, 1947: Das Forscherehepaar Catherine und Keith Hayes adoptiert Viki kurz nach ihrer Geburt und zieht sie mit einem eigenen Kind auf. Viki spielt gern im Garten und liebt es, herumzutoben. Doch Sprechen lernt sie nie richtig. Als sie zweieinhalb Jahre alt ist, haben die Hayes ihr mühsam vier Wörter beigebracht: »mommy«, »daddy«, »cup« (Tasse) und »up« (rauf, im Sinn von huckepack nehmen).

Denn Viki ist eine Schimpansin – der erste Menschenaffe, der systematisch Sprachunterricht erhält. Dabei formen die Hayes ihr mit den Fingern die Lippen. Diesen Trick übernimmt die Schimpansin und nutzt ihn auch später noch. Sprechen fällt ihr sichtlich schwer.

Die Artikulation von Sprachlauten erfordert nicht nur passende Lippenstellungen, sondern eine Vielzahl fein koordinierter Bewegungen im gesamten Stimmtrakt. Bei stimmhaften Lauten, also den Vokalen und manchen Konsonanten, bringt der Kehlkopf zudem die ausströmende Luft in Schwingung. Zunge, Mund-Rachen-Nasen-Raum und Lippen formen dann einzelne Laute und dämpfen oder verstärken die Frequenzen. Forscher fragen sich seit Langem, ob Affen nicht sprechen können, weil ihr Gehirn die Abläufe nicht mit der notwendigen Präzision zu steuern vermag – oder weil sie die komplexen Stellungen und Bewegungen rein anatomisch nicht zu Stande bringen.

Der Mund-Rachen-Raum von Affen unterscheidet sich von dem des Menschen. Ihr Vokaltrakt ist kürzer und der Kehlkopf nicht permanent abgesenkt wie bei uns. Fehlende Voraussetzungen in diesem Bereich hielten viele Forscher deshalb zunächst für ein Haupthindernis zum Sprechen. Diese These unterstützte Ende der 1960er Jahre eine Studie des amerikanischen Linguisten und Kognitionsforschers Philip Lieberman. Am Abdruck des Stimmtrakts eines verstorbenen Rhesusaffen hatte er mit einem Computermodell ermittelt, welche Laute dem Tier möglich gewesen wären. Lieberman schloss aus seinen Befunden, dass Affen über ein sehr eingeschränktes Lautrepertoire verfügen und diverse Vokale gar nicht produzieren können.

Eine vergleichbare Untersuchung mit modernen Methoden an einem lebenden Affen veröffentlichte kürzlich ein Team um den Evolutions- und Kognitionsbologen Tecumseh Fitch von der Universität Wien. Von einem Javaneraffen machten die Forscher beim Fressen, bei verschiedenen Gesichtsausdrücken und bei Vokalisationen Röntgenaufnahmen von Kopf und Hals. An diesen vermaßen sie die räumlichen Verhältnisse in seinem Vokaltrakt und somit seine natürlichen Möglichkeiten, den Mundraum zu verändern. Sie ermittelten 99 unterschiedliche Konstellati-

onen und wählten davon diejenigen aus, die am stärksten voneinander abwichen. So kamen sie auf fünf theoretisch mögliche »Affen-Vokale«. Wie diese klingen würden, errechneten sie mit einem Computermodell.

Fünf Laute erschienen den Forschern plausibel, da auch viele menschliche Sprachen mit ungefähr dieser Anzahl an Hauptvokalen auskommen. Die theoretischen Affenvokale würden laut der Studie etwa so klingen wie in den englischen Wörtern »bit«, »bet«, »bat«, »but« und »bought«. Testpersonen konnten Simulationen der errechneten Laute recht gut voneinander unterscheiden.

Der neuen Studie zufolge haben Affen ein achtmal größeres phonetisches Potenzial, als Lieberman annahm. Dem Forscherteam fiel aber auf, dass insbesondere ein langes [i] fehlt, einer der so genannten extremen Vokale. Speziell die Erzeugung eines [i] bringt den menschlichen Stimmapparat an seine Grenzen. Wir bemerken es im Alltag zwar meist nicht, doch Vokale klingen bei großen Menschen anders als bei kleinen, da ihr Vokaltrakt länger ist. Dass wir sie trotzdem als richtig wahrnehmen, liegt daran, dass wir die extremen Vokale, und vor allem das lange [i], als Bezugsgröße verwenden. Dieses dient somit der besseren Verständigung.

Eigentlich könnten Affen verschiedene Vokale bilden – und Konsonanten sowieso

Fitch glaubt, dass sich seine Ergebnisse auf andere Affenarten übertragen lassen. Eine zweite Studie – von Forschern um den Neurolinguisten Louis-Jean Boë von der Universität Grenoble Alpes – stützt diese These. Das Team zeichnete die Rufe von Guinea-Pavianen auf, untersuchte also tatsächliche und nicht nur hypothetische Laute. Davon sahen fünf im Sonogramm aus wie Vokale.

Nun gehören zu einer gesprochenen Sprache normalerweise neben den Vokalen die Konsonanten. Wenn sie fehlen, leidet die Verständlichkeit von Wörtern meist viel mehr als bei fehlenden Vokalen. An potenziellen Konsonanten scheint es gerade den Menschenaffen aber nicht zu mangeln. Affen produzieren, etwa mit den Lippen oder in der Kehle, eine Palette von geräuschhaften, schmatzenden, schnatternden, pustenden oder Stoßlauten. Auch die Zunge könnte dabei beteiligt sein. Beim Menschen liegt diese dank unseres permanent abgesenkten Kehlkopfs tiefer im Rachenraum und lässt sich deswegen freier bewegen.

Laut Fitch senkt ein Affe jedoch regelmäßig seinen Kehlkopf ab – und zwar dann, wenn er Laute von sich gibt. Das dürfte ihn allerdings einige Energie kosten und nicht so präzise Geräusche und Vokalisationen ermöglichen, wie es der Mensch kann. Wie gut man die errechneten »Affen-vokale« verstehen würde, testete Fitchs Team, indem es anhand der Aufnahmen die Frage »Will you marry me?« (Möchtest Du mich heiraten?) synthetisierte. Das Ergebnis klingt zwar ziemlich befremdlich – ist aber verständlich (<http://tinyurl.com/affensatz>). Bei Schimpansen würde der Satz, so vermutet Fitch, der Menschensprache mehr ähneln, schon weil sie größer sind und ihr Vokaltrakt fast dieselbe Länge hat wie unserer. Auch haben sie eine

längere Zunge, die sie besser zu kontrollieren vermögen als ein Javaneraffe.

Doch wieso können Affen dann nicht sprechen – obwohl sie von der Anatomie ihres Mund- und Rachenraums her offenbar dazu fähig wären, verschiedene Konsonanten und Vokale zu erzeugen? Wie viele andere Wissenschaftler vermutet Fitch, dass ihr Gehirn nicht die Voraussetzungen bietet, Silben und Wörter zu bilden. Neuronale Schaltkreise müssten Atmung und Vokaltrakt sehr präzise ansteuern, somit genau abgestimmte Bewegungskombinationen in Höchstgeschwindigkeit hervorbringen.

Begrenzt können Affen ihren Lautapparat durchaus willentlich beeinflussen: Im Zoo von Indianapolis etwa lernte der Orang-Utan Rocky, auf Kommando höhere oder tiefere Grunzlaute von sich zu geben. Diese Menschenaffen vermögen auch stimmhafte Alarmrufe mit stimmlosen Lauten zu kombinieren. Ob sie dazu in der Lage wären, Vokale mit Konsonanten zu verknüpfen, vielleicht sogar absichtlich, weiß man noch nicht.

Beim Menschen kommen die motorischen neuronalen Signale, die an den Kehlkopf weitergeleitet werden, unter anderem aus dem Motorkortex, sind also willentlich steuerbar. Bei Affen scheinen die Befehle hauptsächlich aus dem Mittelhirn zu stammen. Entsprechende Verbindungen zur motorischen Hirnrinde fehlen ihnen wohl. Überdies ist der Motorkortex beim Menschen stark mit der Höririnde vernetzt, bei Schimpansen hingegen wesentlich weniger und bei Makaken kaum. Das ermöglicht uns zusätzlich eine viel bessere Kontrolle über unsere Lautäußerungen, die gerade beim Sprechen wichtig ist.

Allein auf Gehirnveränderungen fußt unser Sprachvermögen jedoch sicherlich nicht. Auch der Stimmapparat hat sich in unserer Evolution stark verändert. Besonders der abgesenkte Kehlkopf trägt zum verständlichen Sprechen bei. Er lag schon beim Neandertaler tiefer, wenn auch vermutlich etwas höher als bei uns. Viele Paläontologen sind davon überzeugt, dass diese Frühmenschen bereits eine Sprache besaßen. Doch dürfte ihre Sprechweise für uns fremdartig geklungen haben, und sie vermochten wohl nicht alle unsere Laute zu bilden.

Die neuen Studien erweisen, dass sich einige wichtige Aspekte der Sprachevolution gut an heutigen Affen erforschen lassen. Was einem von ihnen zumindest theoretisch möglich ist, konnte unser letzter gemeinsamer Vorfahre wahrscheinlich auch. ◀

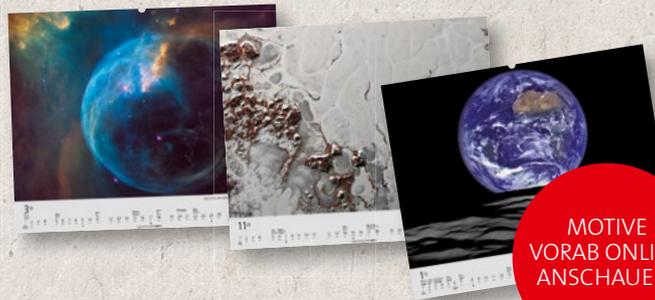
Nicole Paschek ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Trier.

QUELLEN

Fitch, W. T. et al.: Monkey Vocal Tracts are Speech-Ready. In: Science Advances 2, e1600723, 2016

Lieberman, P. H. et al.: Vocal Tract Limitations on the Vowel Repertoires of Rhesus Monkey and Other Nonhuman Primates. In: Science 164, S. 1185–1187, 1969

Boë, L.-J. et al.: Evidence of a Vocalic Proto-System in the Baboon (*Papio papio*) Suggests Pre-Hominin Speech Precursors. In: PLoS One 12, e0169321, 2017



STERNE UND WELTRAUM

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2018

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

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

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

Hier können Sie bestellen:

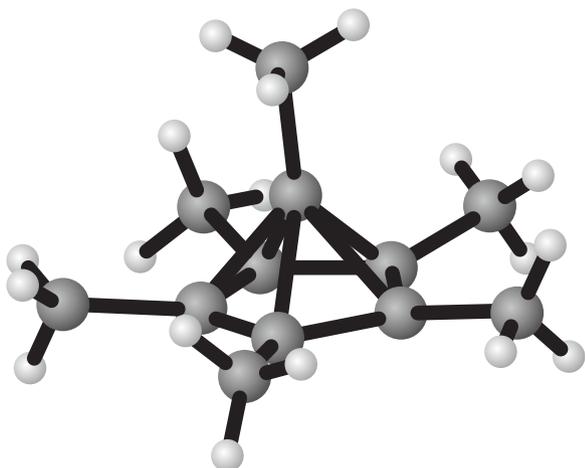
Telefon: 06221 9126-743
sterne-und-weltraum.de/kalender
E-Mail: service@spektrum.de

CHEMIE EIN KOHLENSTOFFATOM MIT SECHS BINDUNGEN

Endlich gelang der experimentelle Nachweis: Kohlenstoff kann unter bestimmten Bedingungen sechs statt der üblichen vier chemischen Bindungen eingehen.

► An der Basis der Organik steht die grundlegende Erkenntnis, dass Kohlenstoff immer genau vier Elektronenpaarbindungen eingeht. Umso mehr reizt es Chemikerinnen und Chemiker seit Jahrzehnten, Ausnahmen von diesem eisernen Gesetz zu finden – also ein Molekül, in dem Kohlenstoff an fünf oder gar sechs andere Atome gebunden ist. Im November 2016 haben Konrad Seppelt und sein Student Moritz Malischewski von der HU Berlin einen solchen heiligen Gral dieser Forschungsrichtung beschrieben: Sie haben erfolgreich das Hexamethylbenzol-Dikation isoliert, in dem ein Kohlenstoffatom von insgesamt sechs Bindungspartnern umgeben ist (siehe Bild unten).

Die zugehörige Struktur einer fünfseitigen Pyramide hatte der niederländische Chemiker Hepke Hogeveen bereits Anfang der 1970er Jahre vorausgesagt. Nach seiner Theorie sollte sich der Kohlenstoff-Sechsering des Benzols beim Verlust zweier Elektronen zu einem Fünfring verkleinern, wobei das sechste Atom des Rings den Schlussstein der Pyramide bildet. Spektroskopische Messungen brachten 1973 erste Hinweise auf die Richtigkeit seiner Hypothese. Doch es sollte noch 43 Jahre dauern, bis Malischewski und Seppelt genug von dem Stoff hergestellt hatten, um Kristalle zu züchten und an ihnen die kuriose Molekülstruktur mittels Röntgenanalyse eindeutig nachzuweisen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MALISCHESKI, M. SEPPETT, K.: DIE MOLEKÜLSTRUKTUR DES PENTAGONAL-PRAMIDALEN HEXAMETHYLBENZOLDIKATIONS (SCHWIBZ) IM KRISTALL. IN: ANGEWANDTE CHEMIE 129, S. 374-376, 2017, FB. 1

Im Kristall bildet das Hexamethylbenzol-Dikation eine pentagonal-pyramidale Struktur. Das Kohlenstoffatom an der Spitze ist an eine Methylgruppe sowie die fünf basalen Kohlenstoffatome gebunden.

Die alten Chemie-Lehrbücher deshalb gleich zu zerreißen, wäre jedoch voreilig, denn auch der sechsfach gebundene Kohlenstoff hält sich streng an die etablierten Regeln, wie Malischewski erklärt: »Das Kohlenstoffatom der Pyramidenspitze ist zwar hexakoordiniert, aber nicht hexavalent, sondern tetravalent wie üblich.« Das heißt, den sechs Bindungspartnern stehen keine sechs Elektronenpaarbindungen gegenüber, sondern wie immer nur vier.

Wie die quantenmechanischen Berechnungen Hogeveens schon in den 1970er Jahren zeigten, ist die Pyramidenstruktur nicht nur möglich, sondern sogar die energieärmste Variante – und das trotz des ungewöhnlichen Kohlenstoffatoms. Die Umlagerung ist nämlich die einzige Möglichkeit des Moleküls, seinen »aromatischen« Charakter mit sechs über den Ring verteilten Elektronen zu bewahren. Danach liegt das System allerdings im Gegensatz zu klassischen Aromaten wie Benzol nicht mehr in einer Ebene: Das Atom an der Pyramidenspitze beteiligt sich ebenfalls am Elektronensextett. Zusammen mit der klassischen Bindung zur Methylgruppe ergibt das die geforderten acht Elektronen (»Oktettregel«) der vier Elektronenpaarbindungen des Kohlenstoffs.

Der Weg zu den exotischen Gebilden führte über die stärksten Säuren überhaupt

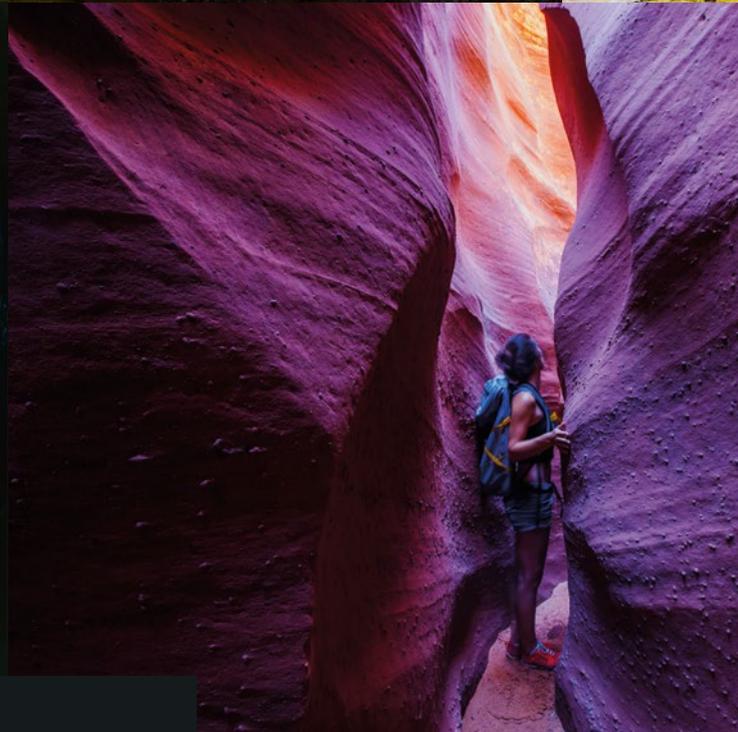
Tatsächlich sind alle Versuche gescheitert, Kohlenstoff mit mehr als acht Bindungselektronen auszustatten. Aber auch schon das nicht ganz so ambitionierte Ziel, zumindest mehr als die vier nach der Oktettregel möglichen Bindungspartner zusammenzukriegen, erwies sich als wahre Herkulesaufgabe. Pionier war der spätere Chemie-Nobelpreisträger George Olah, dem es in den 1960er Jahren gelang, Kohlenwasserstoffe zu protonieren, also ein zusätzliches positiv geladenes Wasserstoffatom an Methan und verwandte Verbindungen zu heften. Dazu verwendete er Stoffe, die fast so exotisch sind wie fünfbindiger Kohlenstoff selbst: so genannte Supersäuren, im Vergleich zu denen nahezu alles andere als Base wirkt. Entsprechend instabil sind die Reaktionsprodukte, die selbst zu den stärksten Säuren überhaupt gehören, weshalb man sie nicht isolieren und einer Strukturbestimmung unterwerfen kann. Jedoch kam der entscheidende Durchbruch schließlich aus anderer Richtung – und mit ihm begann ein zwei Jahrzehnte währender Streit.

Kohlenstoff mit mehr als vier Bindungspartnern war zur Zeit von Olahs Experimenten schon seit einigen Jahren bekannt. Bereits 1963 hatten Arbeitsgruppen aus der Munitions- und Treibstoffindustrie die Carborane entdeckt: ikosaederförmige Atomgruppen aus Bor und Wasserstoff, die zwei Kohlenstoffe enthalten. In ihnen hat jedes Bor- und Kohlenstoffatom im Käfig sechs Bindungspartner.

Paradoxe Weise kommt die große Anzahl Bindungen zu Stande, weil das Molekül besonders wenige Elektronen enthält. Bor hat nur drei Elektronen übrig, kann aber wie Kohlenstoff prinzipiell vier Bindungen eingehen. Deswegen herrscht in Verbindungen des Elements ein chro-



I ATEMBERAUBENDE BILDER,
BEEINDRUCKENDE VIDEOS UND
PACKENDE GESCHICHTEN AUF
NATIONALGEOGRAPHIC.DE



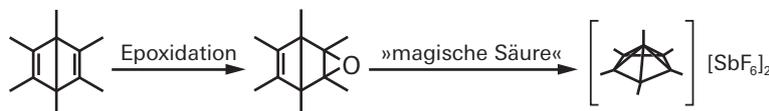
Erlebe die ganze Welt von NATIONAL GEOGRAPHIC
in spannenden Artikeln rund um Wissenschaft, Tiere,
Reise und Abenteuer, Kultur und Natur.

Jetzt auf nationalgeographic.de



I WEITER VORAN

Herstellung des Hexamethylbenzol-Dikations



So ungewöhnlich wie seine Struktur ist auch die Herstellung des Hexamethylbenzol-Dikations. Ausgangspunkt ist die mit sechs Methylgruppen ausgestattete Variante des Dewarbenzols, einer chemischen Kuriosität mit der gleichen Summenformel wie Benzol, aber anderer Struktur. Dessen Epoxid lösten Seppelt und Malischewski in »magischer Säure« auf, einem Gemisch aus Fluorschwefelsäure und Antimonpentfluorid, das zu den stärksten Säuren überhaupt gehört. Der Sauerstoff

verschwindet dadurch als O^{2-} aus dem Molekül. Es entsteht zweifach positiv geladenes Hexamethylbenzol, das aber nun keinen Benzolring mehr enthält: Die Atome haben sich spontan umgelagert. Der Stoff bildet ein Salz mit Antimonhexafluorid, dessen Kristalle bei niedrigen Temperaturen und unter Sauerstoffausschluss stabil sind.

Um zu verstehen, wie die Bindung funktioniert, kann man sich das Hexamethylbenzol-Dikation als zusammengesetztes Molekül vorstellen. Einen Teil bildet dabei ein

negativ geladener Fünfring mit fünf Methylgruppen – ein Molekül, das man in der organischen Chemie gut kennt und kurz als Cp^* bezeichnet. Das Cp^* -Anion ähnelt dem Benzolring; wie dieser trägt es sechs über den Ring verschmierte Elektronen und ist deswegen aromatisch. Auf der anderen Seite steht ein Ethanmolekül, dem an einem der beiden Kohlenstoffatome die drei Wasserstoffatome samt ihrer Bindungselektronenpaare fehlen, so dass es drei positive Ladungen aufweist. Steckt man dieses amputierte Molekül mit dem positiven Ende voran senkrecht in den Ring, übernehmen die sechs Elektronen im Ring die Bindung zwischen Ring und Pyramidenspitze.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MALISCHESKI, M., SEPELT, K.: DIE MOLEKÜLSTRUKTUR DES PENTAGONAL-PRISMALLEN HEXAMETHYLBENZOLDIKATIONS C₆(CH₃)₆²⁺ IM KRISTALL. IN: ANGEWANDTE CHEMIE 129, S. 374-376, 2017, FIG. 2

nischer Elektronenmangel. Diese Umstände ermöglichen einen speziellen Bindungstyp, die Mehrzentrenbindung. Darin sind die Elektronen nicht wie normalerweise in der organischen Chemie paarweise zwischen je zwei Atomkernen angeordnet, sondern jedes Elektronenpaar bedient mehrere Atombindungen gleichzeitig. In den Carboranen sind auch Kohlenstoffatome daran beteiligt.

In konventionellen organischen Molekülen geschieht das nicht – Kohlenstoff hat dafür eigentlich zu viele Elektronen. Schon seit den 1940er Jahren vermuten Fachleute jedoch, dass einige positiv geladene organische Verbindungen diese Regel verletzen. Sie bilden demnach ebenfalls Mehrzentrenbindungen und enthalten fünf- und sechsfach gebundene Kohlenstoffatome. Man bezeichnet sie deswegen als nichtklassische Ionen.

Moderne Analyseverfahren beenden einen Jahrzehnte währenden Streit

Heftiger Widerspruch kam allerdings 1961 vom späteren Nobelpreisträger Herbert Brown, der die Vertreter der Hypothese beschuldigte, Indizien zu ignorieren, die auf klassische Mechanismen wie schnell wechselnde Bindungen hinwiesen. Die Gegenseite, darunter George Olah, wehrte sich. Das Ergebnis war ein – in Browns Worten – »heiliger Krieg« um die nichtklassischen Ionen, der bis in die 1980er Jahre hinein andauerte.

Dank immer modernerer Analyseverfahren häuften sich hingegen zunehmend die Hinweise darauf, dass die nichtklassische Interpretation korrekt ist. Auf einen strengen

Beleg musste die Fachwelt jedoch noch bis 2013 warten. In jenem Jahr wies eine Arbeitsgruppe um Ingo Krossing von der Universität Freiburg das lange umstrittene fünfbindige Kohlenstoffatom in dem so genannten Norbornyl-Kation eindeutig nach. Das Resultat habe sie inspiriert, das Kunststück mit dem sechsfach gebundenen Kohlenstoff zu wiederholen, schreiben Seppelt und Malischewski in ihrer aktuellen Veröffentlichung über das Hexamethylbenzol-Dikation.

Die beiden Wissenschaftler schließen damit nun den Kreis zu den Carboranen, die den ersten Hinweis auf diese untypische Bindungsform beim Kohlenstoff gaben. Denn die Bindungssituation im pyramidenförmigen Hexamethylbenzol-Dikation ähnelt der in den ikosaedrischen Bor-Clustern verblüffend. So ungewöhnlich die Chemie solcher nichtklassischen Moleküle jedoch ist – die Oktettregel bleibe auch beim Kohlenstoff mit sechs Bindungspartnern streng gewahrt, betont Malischewski. Der zur Pyramide umgelagerte Benzolring mit seiner exotischen Mehrzentrenbindung sei aber spektakulär genug. ◀

Lars Fischer ist Chemiker und Redakteur bei Spektrum.de.

QUELLEN

Malischewski, M., Seppelt, K.: Die Molekülstruktur des pentagonal-pyramidalen Hexamethylbenzol-Dikations $C_6(CH_3)_6^{2+}$ im Kristall. In: Angewandte Chemie 129, S. 374–376, 2017

Scholz, F. et al.: Crystal Structure Determination of the Nonclassical 2-Norbornyl Cation. In: Science 341, S. 62–64, 2013



SPRINGERS EINWÜRFE DIE LIEBE IN DEN ZEITEN DER ROBOTER

Menschenähnliche Automaten verändern zahlreiche Gewerbe – selbst das älteste der Welt. Gibt es bald Liebesbeziehungen mit intelligenten Maschinen?

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

► spektrum.de/artikel/1496895

Seit lernfähige Computer menschliche Meisterspieler nicht nur im Schach schlagen, sondern neuerdings auch bei Go gewinnen und im Poker siegreich bluffen, zeichnet sich eine Zukunft ab, in der sie uns auf Augenhöhe gegenüberreten, zum Beispiel als Helfer im Wissenschaftsbetrieb – und tendenziell sogar als uns überlegene Kollegen (siehe meinen Einwurf in **Spektrum** September 2017).

So ein intellektueller Wettstreit zwischen Mensch und Maschine ließe sich durchaus als Gewinn verbuchen, nach der Devise: Konkurrenz belebt das Forschungsgeschäft. Der intelligente Automat siebt riesige Datenmengen, zieht daraus selbstständig Schlüsse, und der Mensch versucht zu verstehen, wie der elektronische Kollege darauf gekommen ist. Aus der Deutung der Resultate ergeben sich neue Forschungsfragen für das Mensch-Maschine-Team, und so weiter.

Lernfähige Maschinen können aber nicht nur kognitive Aufgaben immer besser lösen. Kürzlich hat die

Inwieweit können Maschinen auch zur Befriedigung sexueller Bedürfnisse dienen?

Foundation of Responsible Robotics, eine in Den Haag ansässige Denkfabrik, die Frage untersucht, inwieweit Roboter zur Befriedigung sexueller Bedürfnisse dienen können (http://responsiblerobotics.org/wp-content/uploads/2017/07/FRR-Consultation-Report-Our-Sexual-Future-with-robots_Final.pdf). Wie sich herausstellt, hat die Entwicklung kommerzieller Sexroboter – wegen des heiklen Themas ohne großes öffentliches Aufsehen – schon Mitte der 1990er Jahre begonnen. Derzeit werden weibliche und männliche Puppen zu Preisen zwischen 5000 und 15000 Dollar angeboten; sie besitzen individuelle äußere Merkmale, Körpersensoren und ein vorderhand recht bescheidenes Verhaltensrepertoire,

das sich aber durch intelligente Software in gewissen Grenzen an den menschlichen Partner anpasst.

In Japan, wo Roboter in der Altenpflege gern als künstliche Kuschtiere und Betreuer eingesetzt werden, nahm bereits 2004 ein hauptstädtisches Sexpuppen-Bordell den Betrieb auf. Seit Kurzem gibt es die erste europäische Einrichtung dieser Art in Barcelona. Manchen Prognosen zufolge wird der Amsterdamer Rotlichtbezirk bis 2050 in größerem Stil Robotersex anbieten.

Wie die imposante Literaturliste der Studie zeigt, wird das Phänomen bereits gründlich beforscht – durch Umfragen, Interviews und soziologische Analysen. Als unstrittig gilt, dass der Markt für Sexroboter wachsen wird, wobei zu den derzeit überwiegend männlichen Kunden ein wachsender Frauenanteil hinzukommen dürfte. Völlig uneins sind sich die Experten hingegen in der Frage, wie Robotersex die Geschlechterrollen beeinflusst: Wird der Mensch durch maschinelle Triebabfuhr liebevoller, oder überträgt sich die Verdinglichung auf den menschlichen Partner? Das erinnert an die Debatte, ob Gewaltdarstellung in den Medien als Aggressionsventil friedlicher macht oder durch Vorbildwirkung gewaltbereiter.

Einen wichtigen Aspekt lässt die Studie ganz außer Acht: Was wird letztlich aus der zwischenmenschlichen Liebe mit all ihren Beziehungsproblemen, wenn sich jederzeit der Verkehr mit einem total anpassungsbereiten und körperlich idealen künstlichen Partner anbietet? Irgendwann – wie ich vermute, bald – wird die erste lernfähige Maschine einen emotionalen Turing-Test bestehen. Sie wird den ohnedies zur Selbsttäuschung bereiten Menschen vergessen lassen, dass er es mit einem technischen Produkt zu tun hat. Wie kann ein natürlicher Partner mit dieser perfekten Wunschmaschine konkurrieren? Wo bleibt die Liebe in den Zeiten der Roboter?

IMMUNTHERAPIE AUFTRAGSKILLER GEGEN KREBSZELLEN

Manche Krebserkrankungen lassen sich sogar im fortgeschrittenen Stadium noch erfolgreich behandeln. Mediziner setzen dabei auf künstlich veränderte Immunzellen.



Avery D. Posey (links) ist Dozent für Pathologie und Labormedizin an der University of Pennsylvania in Philadelphia. **Carl H. June** (Mitte) arbeitet an der gleichen Einrichtung als Professor für Pathologie und Labormedizin. **Bruce C. Levine** ist ebenda Professor für Gentherapien gegen Krebs. Offenlegung von Interessenkonflikten: Wie zahlreiche andere Krebsforscher auch, stehen die Autoren in geschäftlicher Beziehung zu profitorientierten Unternehmen. Dazu gehören Novartis, Tmunity Therapeutics und weitere Firmen, die mit Zelltherapien und Krebsforschung befasst sind.

► spektrum.de/artikel/1496897

► Eigentlich liegt der Gedanke nahe: Im Kampf gegen Krebs sollte das Immunsystem ein mächtiger Verbündeter sein. Doch frühe Versuche, dies klinisch nutzbar zu machen, endeten meist enttäuschend. Mittlerweile kennen wir den Grund dafür – die Forscher hatten nicht genug getan, um einen Hauptakteur des Immunsystems zu stimulieren, nämlich die T-Lymphozyten oder kurz T-Zellen. Wenn man sie nicht »scharfschaltet«, damit sie Tumorzellen besser erkennen und attackieren können, dann schickt man das Immunsystem quasi mit Papierfliegern und Luftgewehren in die Schlacht gegen Krebs.

Erste Hinweise, dass man die T-Zellen für diesen Kampf beträchtlich aufrüsten muss, gab es schon in den 1980er Jahren. Um die Immunreaktion zu verstärken, entnahmen Wissenschaftler damals T-Zellen aus Patienten, veränderten sie im Labor und gaben sie in viel größerer Zahl wieder in den Körper des Patienten zurück. Die Behandlung half einigen Erkrankten, doch meist hielt die Wirkung nicht lange an: Die künstlich eingebrachten T-Zellen stellten ihre Aktivität schon bald ein.

Um das Problem anzugehen, haben wir gemeinsam mit anderen Forschern eine Strategie ausgearbeitet, die sich nun in klinischen Studien als höchst vielversprechend erweist. Mitte der 1990er Jahre suchten wir neue Methoden zum Behandeln von HIV-Infektionen. Damals entwickelten zwei von uns (June und Levine) ein Prozedere, mit dem sie T-Zellen von Patienten zahlreicher vermehren, schlagkräftiger und langlebiger machen konnten, als es zuvor möglich gewesen war. In den 2000er Jahren kam ein weiterer inno-

vativer Ansatz auf: die gentechnische Veränderung von T-Lymphozyten, um diese zu befähigen, bestimmte Krebszellen gezielt aufzuspüren und anzugreifen, vor allem Leukämie- und Lymphomzellen. Diese Krebsarten gehen aus weißen Blutzellen respektive deren Vorläufern hervor.

In den zurückliegenden Jahren haben Mediziner solche synthetisch veränderten Lymphozyten namens CAR-T-Zellen (CAR steht für »Chimeric Antigen Receptor«, siehe **Spektrum** Oktober 2016, S. 32) in dutzenden Studien getestet. Insgesamt waren daran beinahe 1000 Patienten mit fortgeschrittenen Leukämien oder Lymphomen beteiligt. Je nach Art der Erkrankung lebt heute mindestens jeder zweite von ihnen bereits länger als zum Zeitpunkt der Diagnose erwartet, und bei einigen hundert sind keine Anzeichen von Krebs mehr nachweisbar.

Mittlerweile zeichnet sich immer deutlicher ab: Die Behandlung mit CAR-T-Zellen, ob allein oder zusammen mit anderen Therapieverfahren, kann bestimmte Krebserkrankungen des Blut bildenden Systems dauerhaft heilen. Nun gilt es, die nächsten Hürden zu nehmen. Forscher müssen klären, ob die CAR-T-Zelltherapie auch gegen andere Krebsarten hilft und ob sich die zum Teil schweren Nebenwirkungen besser kontrollieren lassen (siehe auch **Spektrum** März 2017, S. 20). Aber die bisherigen Erfolge sind ermutigend.

Als wir vor vielen Jahren den Weg einschlugen, der uns letztlich zu den CAR-T-Zellen führte, war schon die erste Aufgabe alles andere als einfach. Wir mussten herausfinden, wie man T-Lymphozyten aus Patienten dazu ertüchtigt

Mehrere T-Lymphozyten (orange) haben sich an eine Krebszelle (braun) geheftet und attackieren sie. Das Bild ist eine eingefärbte Raster-Elektronenmikroskopische Aufnahme. Der gezeigte Ausschnitt ist ungefähr 30 Mikrometer (millionstel Meter) breit.



STEVE GOSCHMEISSNER / SCIENCE PHOTO LIBRARY

gen kann, Pathogene im Körper wirksamer abzutöten. Sie werden aktiv, wenn sie Signale von anderen Immunaktoren erhalten, den dendritischen Zellen (englisch: dendritic cells, DCs). Dann legen die T-Zellen richtig los: Sie teilen und vermehren sich und produzieren zahlreiche Kopien ihrer selbst, die allesamt die gleiche, von den DCs vorgegebene Zielstruktur attackieren – und sie schütten Zytokine aus, Proteine also, die die Immunreaktion noch weiter verstärken. Nach einigen Tagen lässt die Aktivität der T-Zellen nach, so dass der Organismus mitsamt seinem Immunsystem zum Normalzustand zurückkehrt.

Mitte der 1990er Jahre, während wir an HIV forschten, entschlossen sich June und Levine, diesen natürlichen Mechanismus zu verbessern. Hierfür wollten sie T-Zellen im Labor stimulieren. Der Plan lautete, einem Patienten einige T-Zellen zu entnehmen, sie zu aktivieren und viel stärker zu vermehren als im Organismus möglich, und schließlich wieder in den Erkrankten zurückzubringen. Dann, so unsere Hoffnung, würde die Immunantwort des Patienten dermaßen verstärkt, dass sie die HIV-Infektion – sowie die zahlreichen weiteren Infektionen bei Aids – bekämpfen könnte.

Zuerst mussten wir aber herausfinden, wie sich die T-Zellen aktivieren lassen. Theoretisch konnten wir sie mit DCs desselben Patienten zusammenbringen, damit diese das entsprechende Signal geben. Doch besonders bei Aids- und Krebskranken schwanken Zahl und Qualität der DCs beträchtlich. Deshalb entschieden wir uns dafür, einen künstlichen Ersatz zu entwickeln. Wir kamen auf kleine magnetische Kügelchen, die wir mit zwei Proteinsorten beschichteten. Wie wir feststellten, ahmen solche Kügelchen die stimulierende Wirkung der DCs nach und übertreffen sie sogar; die Zahl der T-Zellen lässt sich damit etwa verhundertfachen. Das Verfahren ist heute eines der wichtigsten, um T-Zellen im Labor zu aktivieren und zu vielfältigen und anschließend in Experimenten oder klinischen Studien einzusetzen.

Wenn der Organismus einen Immunangriff gegen Krebszellen initiiert, steht er vor zwei großen Herausforderungen. Erstens sind die »Feinde« aus seinen eigenen

Zellen hervorgegangen. Da das Immunsystem körpereigenes Gewebe normalerweise verschont, tut es sich oft schwer damit, entartete von normalen Zellen zu unterscheiden. Zweitens nutzen Krebszellen viele Tricks, um der Körperabwehr zu entgehen. Sie schaffen beispielsweise ihr eigenes Mikromilieu, worin sie sich vor den Immunzellen verstecken – und sie vereiteln Abwehrreaktionen, unter anderem, indem sie körpereigene Immunbremsen missbrauchen, die Immuncheckpoints (siehe **Spektrum** November 2015, S. 15).

Doppelte Sicherheitsprüfung seitens der Körperabwehr

Um gesundes Körpergewebe vor dem »Beschuss durch eigene Truppen« zu schützen, nimmt eine T-Zelle einen Sicherheitscheck vor, bevor sie eine Krebszelle attackiert: Sie prüft, ob auf deren Oberfläche zwei bestimmte Molekülsorten vorhanden sind. Bei der einen handelt es sich um große Proteinkomplexe namens MHC (Major Histocompatibility Complex, deutsch: Hauptgewebeverträglichkeitskomplex). MHC-Moleküle verbinden sich mit Bruchstücken jener Proteine, die in der Zelle produziert werden, und weisen die Zelle damit nach außen hin als harmlos oder schädlich aus; die von ihnen präsentierten Proteinfragmente sind Antigene, können also von den Akteuren der Immunabwehr spezifisch erkannt werden. Die zweite Molekülsorte umfasst »kostimulatorische Liganden«, die den T-Zellen das Signal zum Angriff geben. Fehlen entweder die antigenpräsentierenden MHC oder die aktivierenden kostimulatorischen Liganden, bleibt die T-Zelle inaktiv und startet keine Attacke. Eine bösartige Zelle hat also mindestens zwei Möglichkeiten, das Immunsystem von sich abzulenken: Entweder sie stellt keine MHC her oder sie prägt kostimulatorische Liganden aus, die die T-Zell-Aktivität bremsen statt ankurbeln.

Doch was, wenn man es nicht den dendritischen Zellen überlässt, den T-Lymphozyten das Ziel vorzugeben, sondern dieses Ziel selbst festlegt – und zwar durch genetische Veränderung der T-Zellen? Man könnte sie beispielsweise gegen ein Antigen scharf machen, das zwar auf Krebszellen vorkommt, aber nicht notwendigerweise von MHC präsentiert werden muss. Und was, wenn man die T-Zellen darüber hinaus noch dazu bringen könnte, ihr Ziel auch ohne zweistufige Sicherheitsprüfung zu attackieren? Beides ist heute möglich, und zwar mit Hilfe der CAR-T-Zell-Technologie.

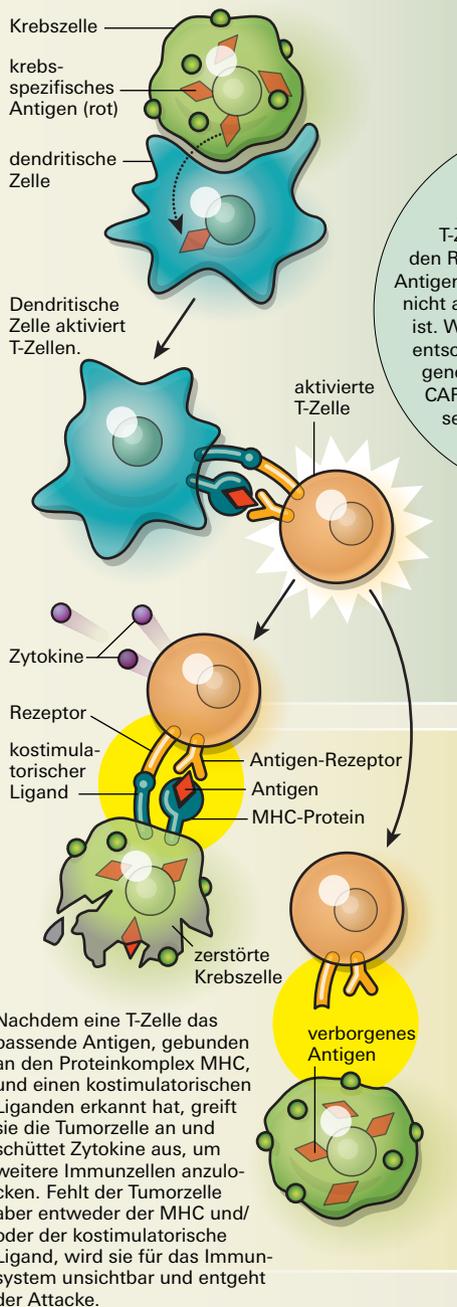
Das Verfahren besteht im Wesentlichen darin, T-Zellen mit Erbanlagen auszustatten, die für ein synthetisches Molekül kodieren, den chimären Antigen-Rezeptor (CAR). Dieses Molekül kann zwei Dinge auf einmal: Es koppelt an das jeweils interessierende Antigen und aktiviert die T-Zelle anschließend – selbst dann, wenn kostimulatorische Signale fehlen. Wir erreichten das, indem wir Elemente von Antikörpern (spezialisierten Proteinen, mit denen der Organismus normalerweise Bakterien und Viren bekämpft) mit anderen Eiweißstoffen kombinierten, die erwiesenermaßen T-Zellen stimulieren. Den antikörperähnlichen Teil des CAR, der aus der Zelloberfläche herausragt, gestalteten wir so, dass er an das von uns ausgewählte Tumorantigen bindet. Der Rest des synthetischen Mole-

AUF EINEN BLICK ANGEHEIZTE IMMUNANTWORT

- 1** Künstlich veränderte Immunzellen, die so genannten CAR-T-Zellen, haben sich als außerordentlich wirksam gegen Leukämien und Lymphome erwiesen.
- 2** Sie verstärken die Abwehrkraft des Organismus gegen bösartige Zellen – können allerdings auch schwere Nebenwirkungen bis hin zum Tod verursachen.
- 3** Durch Weiterentwickeln der CAR-T-Zell-Technologie hoffen Forscher, die Nebenwirkungen besser kontrollieren zu können und Ansätze gegen weitere Krebsarten zu finden, insbesondere gegen solide Tumoren.

Normale Immunantwort

Ein gesundes Immunsystem kann Krebszellen erkennen und zerstören und tut dies häufig auch. Doch der Prozess ist kompliziert und versagt manchmal. Dendritische Zellen nehmen Proteine auf, die entweder auf oder in bösartigen Zellen zu finden sind. Sie verarbeiten diese Proteine und präsentieren Stücke davon – die Antigene – auf ihrer Oberfläche, um sie den T-Lymphozyten zu zeigen. Die T-Lymphozyten suchen daraufhin sämtliche Zellen im Körper, die sowohl das entsprechende Antigen besitzen als auch einen Proteinkomplex namens MHC, und attackieren diese – vorausgesetzt allerdings, die Zielzellen tragen noch ein drittes Protein, einen kostimulatorischen Liganden.



Abkürzung 1

Anders als gewöhnliche T-Zellen tragen CAR-T-Zellen den Rezeptor CAR, mit dem sie ein Antigen auch dann erkennen, wenn es nicht an ein MHC-Molekül gebunden ist. Welches Antigen dies sein soll, entscheiden die Mediziner. Um die genetische Bauanleitung für den CAR in die T-Zellen einzuschleusen, bedienen sie sich eines unschädlichen Virus.

Abkürzung 2

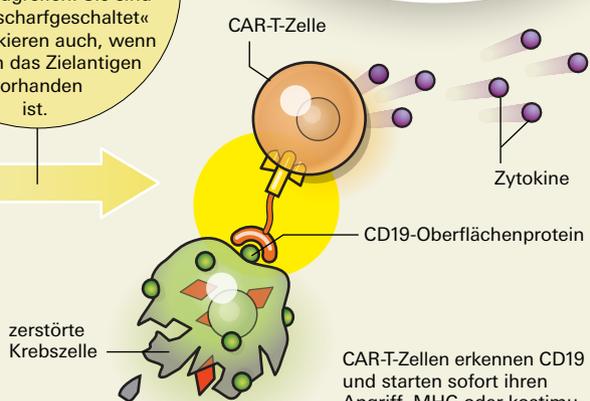
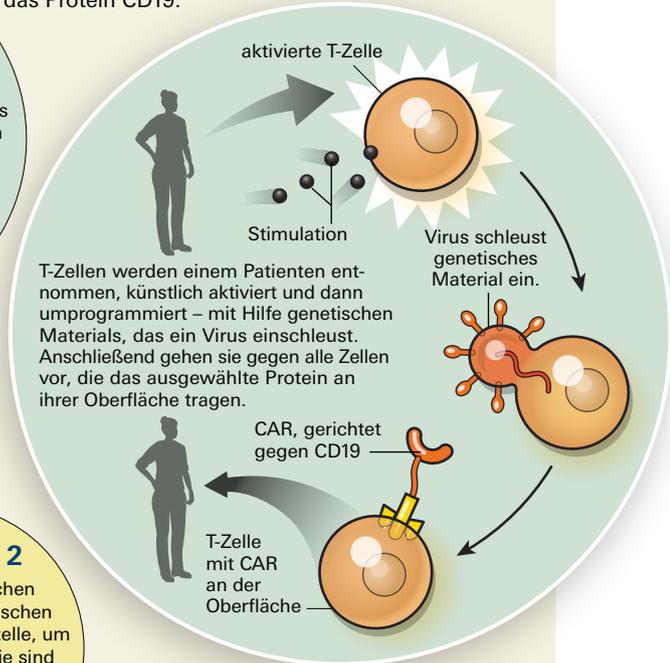
CAR-T-Zellen brauchen keinen kostimulatorischen Liganden auf der Zielzelle, um diese anzugreifen. Sie sind immer »scharfgeschaltet« und attackieren auch, wenn lediglich das Zielantigen vorhanden ist.

Aufgerüstete Immunzellen

In den zurückliegenden Jahren haben Wissenschaftler experimentelle Therapieverfahren entwickelt, um die Fähigkeit des Immunsystems zu verbessern, bösartige Tumorzellen zu erkennen und zu zerstören. Als besonders effektiv gegen fortgeschrittene Leukämien und Lymphome hat sich das Verabreichen künstlich veränderter Immunzellen erwiesen, der »CAR-T-Zellen«. Diese enthalten zwei eingebaute Abkürzungen des Immunmechanismus, welche die Körperabwehr enorm verstärken.

Frisierte Immunantwort

CAR-T-Zellen (CAR steht für »Chimerer Antigen Rezeptor«) sind gentechnisch manipulierte T-Zellen, die wesentlich effektiver wirken als alles, was der Organismus selbst produziert. Im Gegensatz zu normalen T-Zellen, die ihre Angriffe meist nach wenigen Wochen einstellen, bleiben CAR-T-Zellen monate- oder jahrelang aktiv. Die Ziele, gegen die sie dabei vorgehen, legt der Mensch fest – beispielsweise das Protein CD19.



küls, der sich durch die T-Zell-Membran hindurch erstreckt, sendet aktivierende Signale aus, sobald das Tumorantigen angekoppelt hat.

Das Konzept, bei der Krebstherapie auf tumorspezifische Antigene zu zielen, ist natürlich nicht neu. Schon in den 1990er Jahren begannen Mediziner damit, ihre Patienten mit monoklonalen Antikörpern zu behandeln, die an bestimmte Proteine auf der Oberfläche von Krebszellen binden. Aber Antikörper baut der Organismus nach spätestens einigen Wochen ab. Stattet man hingegen T-Zellen mit ihnen aus, bleiben sie so lange erhalten wie die Zellen, das heißt mitunter mehrere Jahre.

Es erwies sich jedoch als schwierig, die T-Lymphozyten dazu zu bringen, das synthetische CAR-Molekül tatsächlich herzustellen. Wir entschlossen uns, hierfür HI-Viren zu nutzen, da diese bekannt dafür sind, T-Zellen sehr effizient zu infizieren. Wir entfernten aus dem Virusgenom die Erbanlagen, die HIV zu einem tödlichen Krankheitserreger machen, und setzten an ihre Stelle die genetische Bauanleitung für das CAR-Konstrukt. Mit den so veränderten HI-Viren infizierten wir T-Zellen, die wir Patienten entnommen hatten. Daraufhin stellten die Zellen das Molekülkonstrukt her und bauten es in ihre Zellmembran ein.

Wir und andere Teams können T-Zellen mit dieser Technik so manipulieren, dass sie Tumorzellen angreifen, nachdem sie nur ein einziges Antigen auf deren Oberfläche erkannt haben – MHC oder kostimulatorische Liganden sind nicht mehr erforderlich. Die T-Zellen lassen sich dabei so präzise »maßschneidern«, dass sie jede gewünschte Zielstruktur – und sogar Kombinationen von Antigenen – treffsicher aufspüren.

Einen Monat nach der Behandlung ließen sich keine leukämischen Zellen mehr im Körper des Patienten nachweisen

Mitte der 1990er und Anfang der 2000er Jahre lernten wir, wie man T-Zellen aus HIV-Patienten in CAR-T-Zellen umwandelt, um diese in klinischen Studien zu erproben und fortgeschrittene HIV-Therapien zu entwickeln. Schon bald begannen diverse Arbeitsgruppen auch damit, CAR-T-Zellen gegen Krebserkrankungen einzusetzen. Wir selbst versuchten hier, Ansätze der verschiedenen Techniken – T-Zell-Aktivierung durch magnetische Kügelchen, CAR-Technologie und virale Genfähren – miteinander zu kombinieren. Dabei stellte sich heraus, wie erstaunlich leistungsfähig die manipulierten Immunzellen sein können.

Das perfekte Ziel für eine CAR-T-Zelle wäre natürlich ein Antigen, das nur auf Tumorzellen vorkommt und nirgendwo sonst, aber so etwas ist sehr selten. Da alle entarteten aus normalen Körperzellen hervorgegangen sind, tragen sie im Wesentlichen die gleichen Antigene wie diese. Ginge man mit einer CAR-T-Zelltherapie gegen solche gemeinsamen Oberflächenmerkmale vor, würde

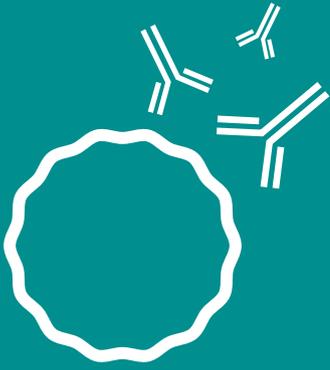
man zwangsläufig neben dem Tumor auch viel gesundes Gewebe zerstören.

Es gibt jedoch einige bemerkenswerte Ausnahmen. Manche Leukämien und Lymphome beispielsweise gehen aus den B-Zellen hervor, die zu den weißen Blutzellen zählen und als einzige Körperzellen in der Lage sind, Antikörper herzustellen. Ein Mensch kann ohne sie leben, vorausgesetzt, er bekommt hin und wieder künstlich hergestellte Antikörper verabreicht. B-Zellen – und alle bösartigen Zellen, die aus ihnen hervorgehen – tragen ein Oberflächenprotein namens CD19. In anderen gesunden Körpergeweben ist dieses Molekül nicht zu finden. Viele Forscher, darunter wir, sahen in CD19 deshalb schon früh ein attraktives Ziel der CAR-T-Zelltherapie.

Auf Fieber, Atemprobleme und fallenden Blutdruck folgte die vollständige Genesung

Nach Vorversuchen an Mäusen begannen wir 2010 eine klinische Studie mit CAR-T-Zellen, die gegen CD19 gerichtet waren. Bei den ersten drei Patienten handelte es sich um Erwachsene mit fortgeschrittener chronischer lymphatischer Leukämie (CLL), die auf andere Therapieverfahren nicht mehr ansprach. Einer von ihnen war William Ludwig, ein pensionierter Strafvollzugsbeamter, der zehn Jahre zuvor seine Diagnose erhalten hatte und nun mehr als zwei Kilogramm entarteter Zellen in sich trug, die über seinen gesamten Körper verteilt waren. Im August 2010 bekam er eine Milliarde CAR-T-Zellen verabreicht, hergestellt durch gentechnische Veränderung seiner eigenen T-Zellen. Zehn Tage später entwickelte er schweres Fieber, Atembeschwerden und gefährlich niedrigen Blutdruck, weshalb die Ärzte ihn auf die Intensivstation verlegten. Wie wir später herausfanden, hatte Ludwigs Immunsystem massiv überreagiert, weil das Einbringen der CAR-T-Zellen mit einer starken Ausschüttung von Zytokinen einhergegangen war – Signalmolekülen, die eine wichtige Rolle bei Immunreaktionen und Entzündungsprozessen spielen. Im Extremfall kann dies zu einem nicht mehr kontrollierbaren, tödlichen »Zytokinsturm« führen.

Ludwig kam zum Glück durch, und einen Monat später ließen sich keinerlei leukämische Zellen mehr in seinem Organismus nachweisen. Das war ein so unerwartetes, außergewöhnliches Ergebnis, dass die Mediziner eine zweite Gewebeprobe nahmen, um sicherzugehen; sie bestätigte den Befund. Auch bei den anderen beiden Patienten, die wir behandelten, war der Therapieerfolg überwältigend. Heute, mehr als sechs Jahre später, sind Ludwig und einer der anderen noch am Leben und ohne jede Spur einer Leukämie. Wie weitere Untersuchungen ergaben, hatten sich die CAR-T-Zellen im Blut und Knochenmark der Patienten vervielfältigt; jede von ihnen (beziehungsweise von ihren Tochterzellen) hatte zwischen 1000 und 100 000 Tumorzellen abgetötet. Als wir die CAR-T-Zellen einige Monate nach dem Eingriff aus Patientenblut isolierten, zeigten sie sich im Labor immer noch fähig, Leukämiezellen mit CD19-Oberflächenmolekülen zu vernichten. Als eine Art Langzeitwächter waren sie zu einem »lebenden Arzneistoff« geworden, der ständig im Organismus patrouillierte und jeder wiederkehrenden Krebszelle den Garaus machte.



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

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

Weitere Informationen finden Sie auf: immunonkologie.de

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



So Aufsehen erregend diese Ergebnisse waren – leider ging uns jetzt das Geld aus, und wir konnten unsere experimentelle Therapie nicht weiter erproben. Gutachter von staatlichen Forschungsorganisationen schätzen die Behandlung als zu riskant ein, weshalb wir keine Fördermittel mehr bekamen. Wir publizierten jedoch Ende 2011 zwei Fachartikel, in denen wir die vorliegenden klinischen Ergebnisse zusammenfassten. Sie lösten ein starkes Medienecho aus, und schon bald meldeten sich etliche Biotechunternehmen, die bei unserem Arbeitgeber, der University of Pennsylvania, nach Lizenzen für das neue Verfahren fragten.

Krebserkrankungen des Blut bildenden Systems sprechen in beispielloser Weise auf die neuen CAR-T-Zell-Therapien an

Schließlich waren wir mit einem unserer Förderanträge erfolgreich und konnten 2012 eine weitere klinische Studie beginnen, dieses Mal mit Kindern, die an akuter lymphatischer Leukämie (ALL) litten. Auf unser Betreiben hin schloss sich die University of Pennsylvania mit dem Pharmaunternehmen Novartis zusammen, damit die weitere Entwicklung und später die behördliche Zulassung des Behandlungsverfahrens finanziert werden könnten. Als diese Partnerschaft bekannt wurde, intensivierten sich rund um den Globus die Anstrengungen um einschlägige Lizenzen und Investitionen, und viele medizinische Forschungszentren gründeten Biotechunternehmen, die neue Varianten der CAR-T-Zell-Technologie zu entwickeln versuchten. Unsere aktuellen Studiendaten zeigen zwölf Monate nach der Behandlung eine Gesamtüberlebensrate bei den Kindern von 62 Prozent. Zum Vergleich: Mit konventionellen Therapieverfahren liegt sie bei unter 10 Prozent.

In den zurückliegenden Jahren berichteten viele Forschergruppen, die in Partnerschaft mit Pharmaunternehmen arbeiten, über erstaunliche Erfolge beim Behandeln fortgeschrittener Leukämien und Lymphome. In unserem Klinikum haben wir 300 Patienten mit CAR-T-Zellen behandelt, die auf entartete B-Zellen abzielten. Die Ansprechraten waren je nach Krankheit unterschiedlich. Von den Patienten mit fortgeschrittener chronischer lymphatischer Leukämie profitierte etwa jeder Zweite von deutlichen klinischen Verbesserungen, etwa einem Verschwinden der Leukämiezellen aus dem Körper. Und bei Kindern mit ALL sprachen sogar neun von zehn vollständig auf die Therapie an: Einen Monat nach der Behandlung waren bei ihnen keine Krebszellen mehr nachweisbar.

Niemand weiß, warum die CAR-T-Zell-Therapie nicht bei allen Krebspatienten anschlägt, deren bösartige Zellen CD19-Moleküle tragen. Manchmal scheitert die Behandlung offenbar, weil sich die eingebrachten CAR-T-Zellen im Patienten nicht vermehren oder weil die Evolution des Krebses neue Leukämiezellen hervorbringt, die keine

CD19-Moleküle produzieren und deshalb von den gentechnisch veränderten T-Lymphozyten nicht erkannt werden. Doch auch wenn man diese Fehlschläge einrechnet, sprechen Krebserkrankungen des Blut bildenden Systems in beispielloser Weise auf die neue Methode an. Zwei Unternehmen haben bei der US-Arzneimittelbehörde FDA bereits die Zulassung von CAR-T-Zell-Therapien beantragt, die sich gegen bestimmte Leukämien beziehungsweise Lymphome richten.

Doch es bleiben noch viele Herausforderungen zu bewältigen. Vor allem gilt es, die schweren Nebenwirkungen der Behandlung zu kontrollieren und möglichst zu vermeiden. Im Allgemeinen kommt es zwar nur selten zu Todesfällen bei den Patienten, doch bei mehreren Menschen mit akuter lymphatischer Leukämie sind im Zusammenhang mit der Therapie tödliche Komplikationen aufgetreten. Das kann mit dem schlechten Gesundheitszustand dieser Patienten zu tun haben, aber auch mit Unterschieden bei den CAR-T-Zellen in verschiedenen medizinischen Einrichtungen.

Eine vordringliche Aufgabe ist es jetzt, CAR-T-Zell-Therapien klinisch zu testen und – im Erfolgsfall – vielen Patienten mit Krebserkrankungen des Blut bildenden Systems verfügbar zu machen. Im Lauf der kommenden Jahre werden Forscher etliche wissenschaftliche und technische Weiterentwicklungen des Verfahrens in klinischen Studien erproben. Um damit Tumorerkrankungen zu behandeln, die nicht von B-Zellen beziehungsweise ihren Vorläufern ausgehen, müssen die Wissenschaftler Antigene finden, die auf den jeweils interessierenden entarteten Zellen häufiger vorkommen als in gesundem Gewebe. Einer von uns (Posey) forscht in diese Richtung, indem er versucht, eine Immuntherapie gegen Brust- und Bauchspeicheldrüsensarkome zu entwickeln. Das sind allerdings Krebsarten mit soliden Tumoren, die sich noch besser vor dem Immunsystem verstecken und es unterdrücken können als Leukämie- und Lymphomzellen, da sie nicht im Blut zirkulieren. Um solche Tumoren zu bekämpfen, arbeitet Posey an CAR-T-Zellen, die nach einer spezifischen Kombination aus Zucker- und Proteinmolekülen fahnden. Theoretisch sollte diese Zusammenstellung nur auf Krebszellen häufig auftreten, was den potenziellen Schaden begrenzen müsste, den CAR-T-Zellen in gesundem Gewebe anrichten können.

Der wissenschaftliche Fortschritt verläuft selten geradlinig. Enttäuschungen, widerlegte Hypothesen und Rückschläge sind unvermeidlich. Aber wir haben keinen Zweifel daran, dass die bisherigen Erfolge der CAR-T-Zell-Therapien es rechtfertigen, künftig weiter in diese Richtung zu forschen. ◀

QUELLEN

Maude, S. L. et al.: Chimeric Antigen Receptor T Cells for Sustained Remissions in Leukemia. In: *The New England Journal of Medicine* 371, S. 1507–1517, 2014

Maus, M. V. et al.: Adoptive Immunotherapy for Cancer or Viruses. In: *Annual Review of Immunology* 32, S. 189–225, 2014

Porter, D. L. et al.: Chimeric Antigen Receptor T Cells Persist and Induce Sustained Remissions in Relapsed Refractory Chronic Lymphocytic Leukemia. In: *Science Translational Medicine* 7, 303ra139, 2015

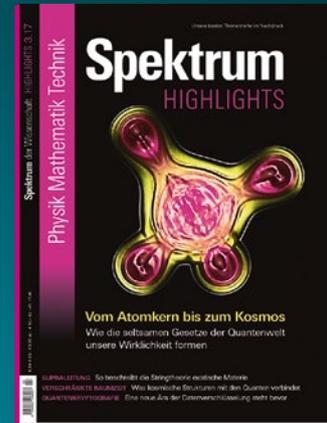
Unsere Neuerscheinungen!



Steinzeit: eine Gesellschaft ohne Fortschritt • Mythische Geschichte: Der Drachenkönig schickt seinen Boten aus • Vietnam und Kambodscha: Nachbarn mit Problemen • Buddhismus: Die richtigen Götter auf seiner Seite • € 8,90 (erscheint am 29.9. 2017)



Universelle Gesetze: Zentraler Grenzwertsatz und Zufallsmatrizen • Rekorde: Sportliche Höchstleistungen und Hitzewellen • Fehlschlüsse: Missbrauch des p-Werts und mangelnde Reproduzierbarkeit • € 8,90



Supraleitung: So beschreibt die Stringtheorie exotische Materie • Verschränkte Raumzeit: Was kosmische Strukturen mit den Quanten verbindet • Quantenkryptografie: Eine neue Ära der Datenverschlüsselung steht bevor • € 8,90



Selbstwert: Wer sich mag, hat's leichter • Mythos Geld: Warum wir Reichtum überschätzen • Fotografie: Knips dich glücklich • Zufriedenheit: Das Geheimnis eines erfüllten Lebens • Serendipität: Eine Formel für Glückspilze € 8,90



Psychotherapie bei Trauer und Sorgen • Wie Yoga, Achtsamkeit und Hypnose wirken • Konfrontation bei Furcht vor Prüfungen oder Zahnarzt • Suizidrisiken einschätzen und richtig reagieren • Angststörungen: Die vier bewährtesten Strategien • € 8,90;



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

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

**Ausgewählte
 Sonderhefte
 auch im
 PDF-Format**

MEDIZIN

VIREN STATT ANTIBIOTIKA

Phagen sind Viren, die Bakterien befallen – und das sehr spezifisch. Gegen einen genau passenden Krankheitskeim haben sie eine durchschlagende Wirkung. Vorausgesetzt, die behördlichen Vorschriften lassen sich regeln, könnten sie bei sonst unbehandelbaren Entzündungen zum Mittel der Wahl werden.



Karin Mölling ist Physikerin, Molekularbiologin und emeritierte Professorin an der Universität Zürich. Sie forscht dort und am Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin über Viren und Krebs.

» spektrum.de/artikel/1496899

► Anfang 2010 bat mich eine Züricher Kollegin um Rat. Wegen einer Kieferentzündung infolge einer missglückten Zahnbehandlung hatte sie wiederholt Antibiotika einnehmen müssen und litt seitdem unter lebensbedrohlichen Durchfällen. Die Maßnahme hatte ihre Darmflora extrem in Mitleidenschaft gezogen und nützliche Keime vernichtet, denn natürlich greifen solche Medikamente auch diese an. An deren Stelle hatte sich das vertrackte Bakterium *Clostridium difficile* durchgesetzt und ließ sich seinerseits nur immer wieder mit Antibiotika zurückdrängen. Ob ich mich wohl auf Kongressen nach

neuen Erkenntnissen oder möglichen Therapieansätzen umhören könnte?

Die Teilnehmer einer Veranstaltung in Paris am Institut Pasteur, das seit mehr als 100 Jahren auf Infektionskrankheiten spezialisiert ist, wussten damals, 2010, keinen Rat. Es gäbe bisher keinen »Killer« gegen *C. difficile*. Aber bald darauf, bei einem Virologentreffen in Korea, erzählte mir ein Journalist der »New York Times« von einem uralten Verfahren und schickte mir die betreffende Publikation: Man verabreicht dem Kranken per Einlauf ein wenig Stuhlextrakt von einem Gesunden. Die Züricher Mediziner hielten hiervon gar nichts. Doch die Frau ließ sich mit Stuhl ihrer Schwester behandeln – und fühlte sich schon ein paar Tage später wie neugeboren!

Die Prozedur war relativ einfach. Der Darm der Empfängerin wurde vorher mit Antibiotika gegen die krankmachenden Keime behandelt, die fremde Stuhlprobe zunächst mit Wasser aufgeschwemmt und für das Klistier dann nur die am Ende überstehende klare Flüssigkeit verwendet. Anschließend haben meine Züricher Mitarbeiter und ich die Darmflora der Patientin über viereinhalb Jahre hinweg regelmäßig untersucht und mit derjenigen der Spenderin verglichen – eine Mammutaufgabe, welche die Großrechner der ETH Zürich stets tagelang beanspruchte. Zwar ähnelte die Zusammensetzung der Bakterien erst nach sieben Monaten der ihrer Schwester, doch empfand sich die Kollegin schon nach einer knappen Woche als geheilt. Die übertragenden Mikroben hatten sich sehr rasch auf ein gesundes Maß vermehrt – das beträgt bei Erwachsenen etwa zwei Kilogramm. Sie hatten den gefährlichen Keim einfach verdrängt.

Heute berichtet jede Apothekezeitung über moderne Versionen der Stuhlübertragung. Die Züricher Mediziner,

AUF EINEN BLICK ERSTAUNLICHE HEILUNGEN MIT BAKTERIOPHAGEN

- 1** Bakterien und ihre Viren existieren stets in engster Gemeinschaft. Ihr Zusammenspiel regelt verschiedenste ökologische Prozesse, auch die Darmflora. Primär verursachen Phagen keine Krankheiten.
- 2** Therapien mit Mikroorganismen inklusive Phagen sind zwar uralte, gerieten aber erst vor 100 Jahren in den Blick der westlichen Wissenschaft – und später wieder in Vergessenheit.
- 3** Phagenbehandlungen sind nun wieder im Gespräch, jedoch höchstens in aussichtslosen Krankheitsfällen zugelassen. Die bisherigen Erfolge verlangen aber danach, das Gebiet weiter zu erforschen.

SERIE

Neue Einblicke in die Welt der Viren

Teil 1: August 2017

Die wahre Natur der Viren

Patrick Forterre

Teil 2: September 2017

Faszinierende Riesenviren

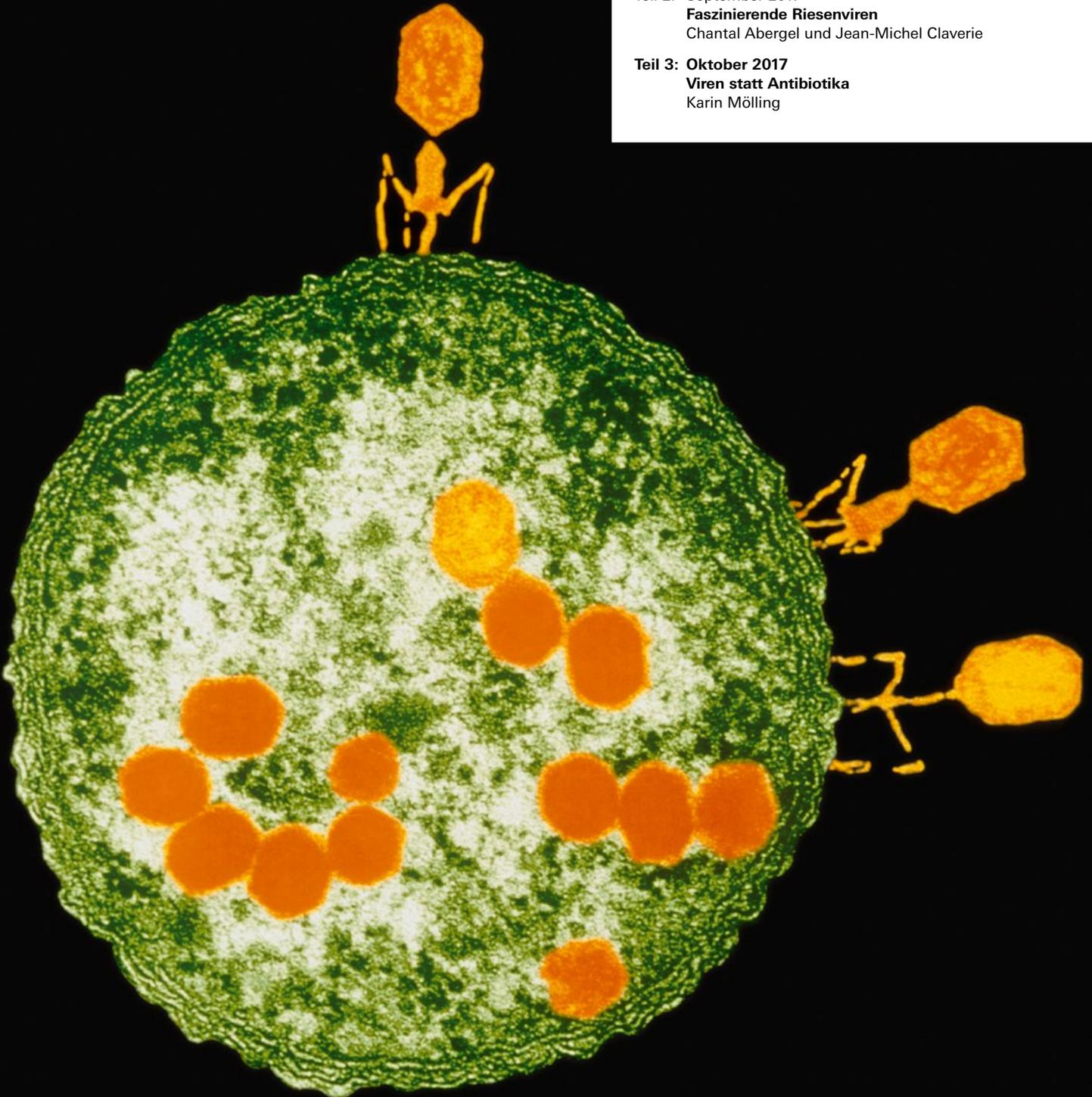
Chantal Abergel und Jean-Michel Claverie

Teil 3: Oktober 2017

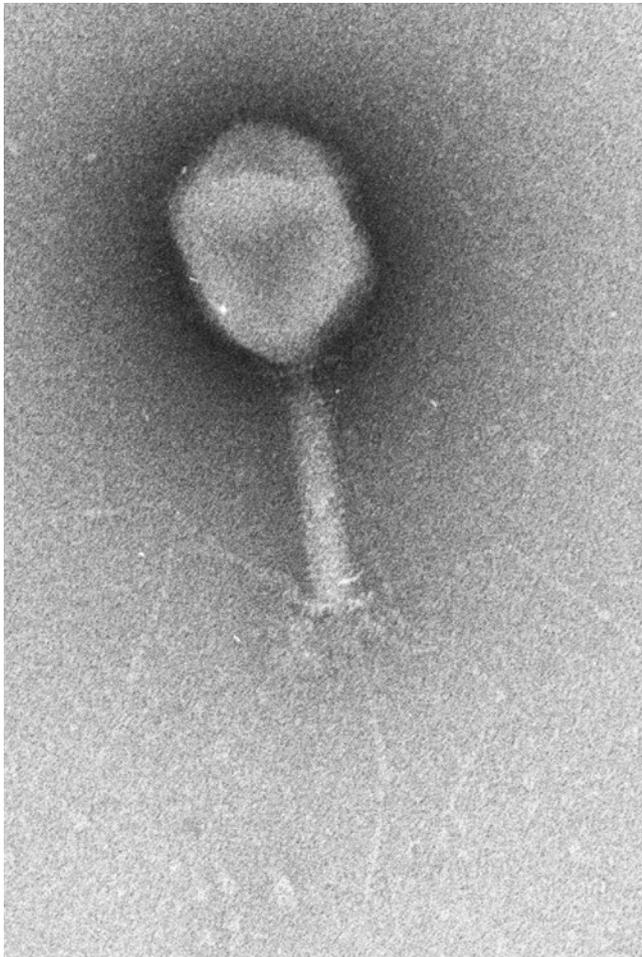
Viren statt Antibiotika

Karin Mölling

LEE D. SIMON / SCIENCE PHOTO LIBRARY



Wenn Phagen – Bakterienviren – ihre spezifischen Bakterien finden, können sie diese unter den richtigen Umständen rasch völlig vernichten. Hier attackiert ein T2-Bakteriophage ein *Escherichia coli*-Bakterium.



So sehen »klassische« T4-Phagen im Elektronenmikroskop aus. Der Kopf, das Kapsid, enthält ihre DNA, die sie durch den kontraktilen »Schwanz« in ein Bakterium injizieren. Die Filamente, mit denen sie sich am Wirt verankern, wirken im Präparat wie abgeknickte Beinchen.

die den Ansatz noch vor wenigen Jahren so vehement als unseriös ablehnten, erhalten für Studien dazu mittlerweile Millionen an Forschungsgeldern. In China war »gelbe Suppe« bereits vor 2500 Jahren gebräuchlich. Die Beduinen versuchten sogar, sich mit Kamelkot zu kurieren. Auch Rinderzüchter kannten solche Maßnahmen für kranke Tiere schon vor mindestens 200 Jahren. Erst langsam beginnen wir zu verstehen, was bei dieser Therapie im Darm genau vor sich geht. Fest steht aber schon: Es kommt nicht nur auf die Bakterien an, sondern gleichermaßen auf die sie befallenden Viren, also die Bakteriophagen oder kurz Phagen. Beide existieren in allen ihren Umwelten stets in engster Gemeinschaft. Das gilt auch für die Darmflora. Die Viren und die Bakterien sorgen hier für ein gesundes, in seiner Bedeutung lange unterschätztes Gleichgewicht. Wegen dieser Zusammenhänge liefern Phagen Medizinern einen Ansatz zur Bekämpfung von Krankheiten.

Das Fachgebiet der Phagentherapie ist zwar eigentlich nicht neu, doch zumindest in den westlichen Ländern seit

den 1940er Jahren – der Ära der Antibiotika – praktisch eingeschlafen. Erst jetzt besinnen sich Forscher vermehrt wieder auf mögliche medizinische Nutzen von Viren, genauer gesagt Phagen. Deshalb sind einige der von mir im Folgenden vorgestellten medizinischen Sachverhalte nach streng wissenschaftlichen Kriterien noch wenig abgesichert. Insgesamt halte ich die schon vorliegenden Erkenntnisse aber durchaus für viel versprechend. Wie viele meiner Kollegen bin ich davon überzeugt, dass die laufenden und zukünftigen Forschungen auf diesem Feld wesentliche Beiträge für unsere Gesundheit leisten werden.

Eine ungeahnt umfangreiche Mikrowelt und deren zahlreiche Spuren in unserem Erbgut

Großen Anteil hat daran die moderne Genomforschung. Nachdem es bis Anfang dieses Jahrhunderts gelungen war, das menschliche Erbgut komplett zu sequenzieren, wurden bereits 1000 Humangenome Buchstabe für Buchstabe bestimmt. Auch das Erbgut vieler anderer Organismen ist mittlerweile detailliert erfasst. Vergleiche dieser immensen Datenmengen brachten schon manche Überraschung. Dazu zählt die sensationelle Entdeckung, dass unsere DNA zahllose »fremde« Gene aufweist: Sie enthält viele Sequenzen, die ursprünglich von diversen völlig anderen Organismen stammen und in der Evolution dann Bestandteile unserer eigenen genetischen Ausstattung geworden sind. Fast die Hälfte unserer Gene rührt beispielsweise von Viren her.

Nicht weniger staunten die Forscher, als sie dann auch die genetischen Sequenzen der Mikrowelt verschiedener Lebensräume erfassten, um die typischen Mikroorganismen etwa im Meer, im Abwasser oder im Erdboden kennen zu lernen – und ebenso die im menschlichen Darm. Wie sich zeigte, beherbergt ein gesunder Mensch im Darm Billionen Bakterien und sogar ungefähr 100-mal mehr Viren (siehe auch »Tausend Billionen Freunde«, **Spektrum** November 2012, S. 26). Während man die Artenzahl der Darmbakterienarten auf wenigstens 1000 schätzt, weiß man über die Viren fast nichts.

Unvorstellbar ist auch ihre Menge in beliebigen Umweltproben. Curtis Suttle von der University of British Columbia in Vancouver (Kanada) etwa hat um 2007 aus 200 Liter Meerwasser die Phagen herausgefiltert und gezählt. Nach seinen Hochrechnungen dürften auf der Erde etwa 10^{31} Bakterien existieren sowie 10^{33} Bakteriophagen, also nochmals das 100-Fache. Aneinandergereiht würden Letztere bis zum Krebsnebel reichen.

Allerdings stoßen die Experten bisher noch auf methodische Grenzen, wenn sie diese Vielfalten ergründen möchten. Die Computer arbeiten vergleichend, das heißt, sie finden nur solche Erbsequenzen, die anderen eingegebenen, schon bekannten Daten ähneln. DNA-Stücke ohne Verwandte im Datenpool fallen unter den Tisch. Als Erkennungshilfe für unbekannte Bakterien – immerhin sind das 80 Prozent – und zur Identifizierung der bekannten nutzen die Mikrobiologen deren charakteristische Ribosomen, genauer gesagt die Untereinheit 16S rRNA. Die Ribosomen bauen die Proteine zusammen. Für Viren – und Phagen –

haben wir bisher leider keinen vergleichbaren einfachen Marker. Auch im Labor lassen sie sich nicht anzüchten. Deswegen wissen wir nie genau, wie viele Phagen und was für Typen eine Probe wirklich enthält.

Die meisten Menschen denken bei Viren an Krankheitserreger, denn in dem Zusammenhang wurden sie Ende des 19. Jahrhunderts zuerst gefunden. Doch im Jahr 1917 fand der Frankokanadier Félix d'Hérelle (1873–1949) am Institut Pasteur Viren, die Bakterien zerstörten. Sie fraßen Löcher in gezüchtete Bakterienrasen hinein. D'Hérelle war von Anfang an von der Bedeutung seiner Entdeckung für medizinische Therapien überzeugt. Er erprobte nun in verschiedenen Ländern den Einsatz von Bakteriophagen bei bakteriellen Epidemien, etwa gegen Cholera in Indien. Todkranke erhielten abends einen speziellen Phagentrunk – und waren am nächsten Morgen geheilt! Leider trat das Wunder nicht immer ein, weswegen diese Therapie seinerzeit viele Mediziner nicht überzeugte. Phagen sind nämlich hoch spezialisiert, passen also jeweils nur auf ganz bestimmte Bakterien und müssen für den Einzelfall extra angezüchtet werden. Um die Heilungschancen zu erhöhen, kam d'Hérelle darauf, den Kranken einen »Cocktail« mit

Vielen im Krieg Verwundeten ersparten Phagenlösungen das Amputieren von Gliedmaßen

verschiedenen Phagen zu verabreichen, in der Hoffnung, dass genau passende Viren darunter sein würden. Vor allem auch bei entzündeten Wunden ging er so erfolgreich zu Werke, denn diese sind oft mit etlichen Bakterientypen infiziert, die sich zudem je nach Gewebe unterscheiden.

Warum Antibiotika, die neuen Wunderwaffen, die erprobten Phagentherapien vergessen ließen

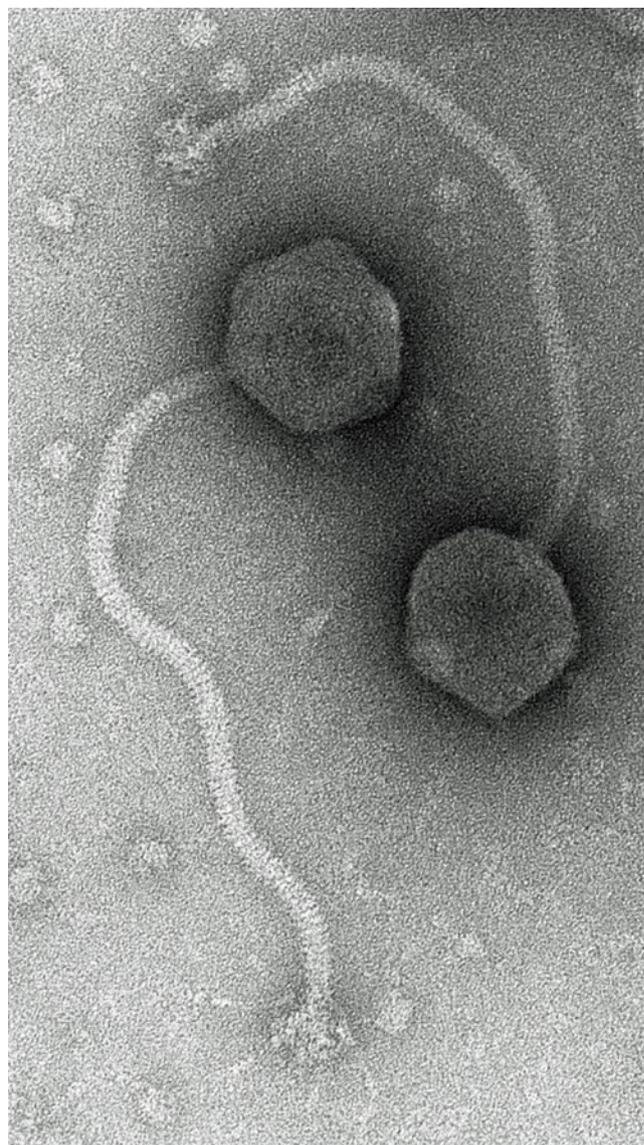
Im Westen erfuhr d'Hérelle wenig Unterstützung. Doch in Tiflis (Georgien) gründete er 1936 zusammen mit seinem Kollegen Georgi Eliava (1892–1937) das noch heute existierende Georgi-Eliava-Institut für Phagenforschung. Im sowjetisch-finnischen Winterkrieg 1939/1940, noch vor der Zeit der Antibiotika, ersparten Phagenlösungen vielen Verwundeten das Amputieren von Gliedmaßen, wenn sie sich im Lazarett eine Infektion mit dem Milzbranderreger zugezogen hatten, die nicht selten tödlich verlief.

Der Siegeszug der Antibiotika während und nach dem Zweiten Weltkrieg ließ die Phagentherapie im Westen vergessen. Die neuen Wunderwaffen töteten eine Bandbreite von Bakterien auch ohne passgenaue Abstimmung. Doch hinter dem Eisernen Vorhang waren Antibiotika jahrelang nicht verfügbar. Daher betrieben Ärzte und Forscher dort den älteren Ansatz weiter. Neben Georgien halten besonders Russland und Polen ihn bis heute hoch.

Phagen dienten in den westlichen Ländern allerdings bis in die späten 1960er Jahre als Modelle, um daran grundlegende genetische Mechanismen zu erforschen,

insbesondere die Genregulation. Später gerieten sie als Studienobjekte jedoch völlig in den Hintergrund, wie ich Mitte der 1970er Jahre am Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin selbst miterlebte. Meine Studien zu Retroviren – auch zu Krebs und später zu HIV – waren gewissermaßen eine Fortsetzung der dort früher betriebenen Phagenforschung. Die beiden Virensorten weisen eine Menge Gemeinsamkeiten auf, nur dass Retroviren nicht Bakterien befallen, sondern beispielsweise Säugerzellen.

Bakterienviren in einer Probe zu bestimmen, ist nicht leicht, zumal ihr Erbgut oft im Wirt versteckt bleibt, ohne dass sie sich massenhaft vermehren. Virologen unterscheiden zwei Zustände: So genannte lytische Phagen entstehen in einem Bakterium zu Hunderten, lösen die Bakterienwand auf, schwirren aus und infizieren weitere Bakterien. Doch Phagen können auch in den Wirt eindringen, ohne ihn zu lysieren. Manche Bakterien bauen deren



Zwei Lambda-Phagen mit langen Schwänzen und kurzen Fibern (»Beinen«). Man teilt die Gruppe nach der Schwanzlänge ein. Abgebildet sind zwei Siphophagen (»Wasserröhren«).

MIT FRIEDRICH VON RUDOLF LURZ, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MOLEKULARE GENETIK

Erbgut sogar – als Prophagen – in ihr eigenes ein und vermehren es dann mit, wenn sie sich teilen. Dieser Zustand hält häufig viele Generationen lang an. Auf ähnliche Weise gelangen Viren übrigens in das Erbgut vieler Lebewesen. Der Waffenstillstand zwischen Phagen und Bakterien kann allerdings bei Umweltstress kippen, beispielsweise bei Nahrungs- oder Platzmangel sowie bei veränderten Temperaturen.

Das lässt sich gut am Beispiel von Algenblüten in Gewässern verdeutlichen. Infolge von Überdüngung vermehren sich Bakterien in längeren warmen Phasen oftmals stark, doch plötzlich hört der Spuk wieder auf. Warum? Der Dichtestress hat die in den Bakterien vorhandenen Phagen aktiviert, diese haben sich daraufhin stark vervielfacht, ihre Wirtsbakterien zerstört, weitere befallen und vernichtet. Normalerweise sind im Meer etwa 80 Prozent der Bakterien von ihren Viren infiziert und beide so aufein-

ander eingespielt, dass Phagen täglich etwa ein Drittel der vorhandenen Bakterien auflösen, wodurch deren Bestandteile wieder in die Nahrungskette gelangen. In einer der Veröffentlichungen zur Tara-Oceans-Expedition der EMBO (der European Molecular Biology Organization), die Virome und Mikrobiome der Weltmeere erfasst und analysiert, vergleichen die Forscher die Verhältnisse in den Ozeanen sogar mit denen im Darm.

Dass im Innern eines gesunden Menschen Viren und Bakterien sozusagen friedlich koexistieren und dass ein ausgewogenes Gleichgewicht von ihnen zum Gesundsein und zur Verdauung sogar notwendig ist, hatte noch vor wenigen Jahren niemand vermutet. Zu unserem Erstaunen konnten wir im Stuhl der eingangs erwähnten Patientin sieben Monate nach der Behandlung lediglich 20 bekannte Phagentypen nachweisen. Erwartet hatten wir wegen der riesigen Zahl an Bakterien eher hunderte. Die Darmflora der Frau glich nun fast völlig der ihrer Schwester. Auch andere Studien zeigten: Ein gesundes Darmmikrobiom enthält wenig Phagen, ein krankes dagegen viele. Letzteres deuten wir als Anzeichen davon, dass sich diese Viren gerade stark vermehren und dabei viele Bakterien vernichten – während gesunde Bakterien, die nicht unter Stress stehen, wenig Phagen freisetzen. Aus dem Grund erfassen wir anscheinend bei einem Menschen mit gesunder Verdauung nur das »core virome«, den harten Kern, also lediglich die häufigsten Phagen.

Plädoyer für neue Vorgaben zur Virenbehandlung

Phagentherapien sind in Deutschland bisher nicht zugelassen. Noch fehlen hierfür die vorgeschriebenen klinischen Studien. Nur in einer Notsituation darf man im Einzelfall solch eine Maßnahme unter bestimmten Bedingungen anwenden, wie es mitunter auch geschieht.

Eine hohe Hürde für phagenhaltige Medikamente bildet die Richtlinie zur Qualitätssicherung im Sinne »guter Herstellungspraxis« (Good Manufacturing Practice, GMP) für Humanarzneimittel und für zur Anwendung beim Menschen bestimmte Prüfpräparate. Unter anderem ist für Medikamente eine gleich bleibende, reproduzierbare Produktqualität gefordert. Dieses Kriterium lässt sich bei Phagenpräparaten schwer erfüllen, die in der Regel angepasst an die Erreger des Patienten und sogar an deren aktuelle Eigenschaften frisch gewonnen werden müssen.

Auch sollte laut Richtlinie möglichst nur ein definierter (!) Wirkstoff auf einmal exklusiv geprüft werden. Das macht den Test von Phagen an Patienten oft obsolet; zum einen, weil Wunden in der Regel mehr als einen bakteriellen Keim aufweisen und jeder Phage nur »seinen« spezifischen Wirt anfällt; zum anderen, weil sowohl Bakterien wie Phagen sich verändern können. So sinnvoll und notwendig die Vorschriften für viele der gängigen medizinischen Wirkstoffe sind, also für chemisch klar definierte Substanzen, so wenig helfen sie, Phagentherapien zu etablieren. Für biologische Medizinpräparate müssten daher gesonderte Vorschriften entwickelt werden, die ihren besonderen Wechselwirkungen mit anderen Organismen gerecht werden.

Comeback der medizinischen Phagenforschung –

eine Auswirkung zunehmender Antibiotikaresistenzen

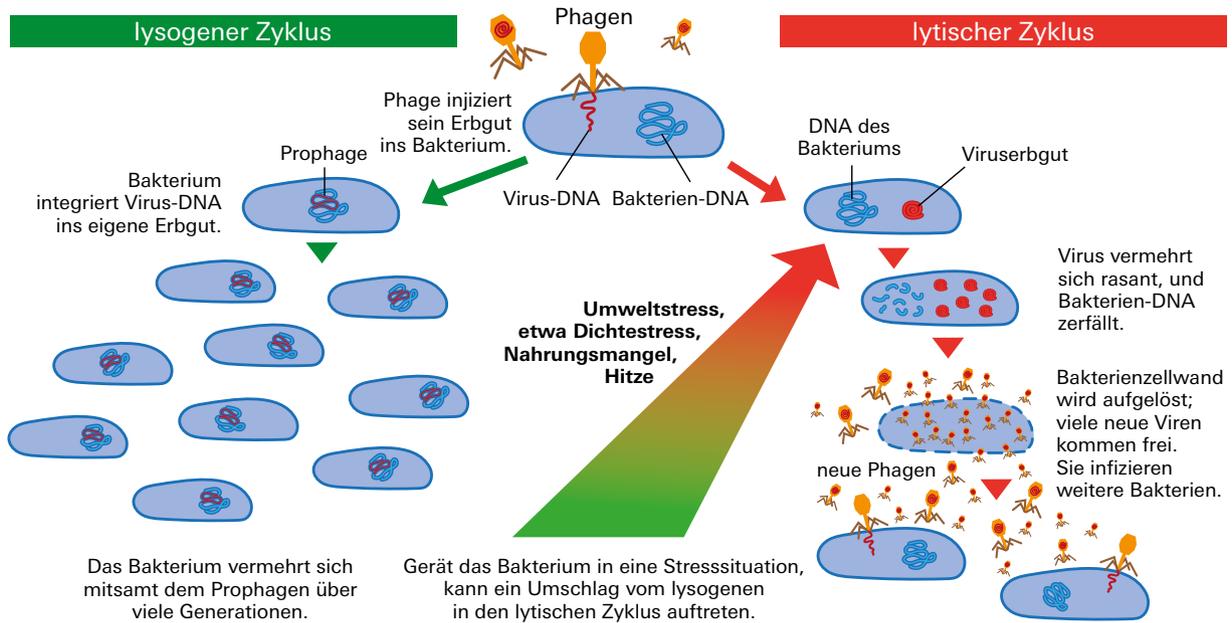
Nach 50 Jahren erlebt die Phagenforschung nun ein Comeback, jetzt aber nicht in der Grundlagengenetik, sondern in der Medizin. Nicht zuletzt die zunehmenden Antibiotikaresistenzen besonders von Krankenhauskeimen tragen hierzu bei. Bemerkenswerter- und erfreulicherweise widmete 2014 das Wissenschaftsmagazin »Nature« der Rückbesinnung auf die Phagentherapie einen Beitrag mit der Überschrift: »Phage therapy gets revitalized«.

Vom Eliava-Institut in Georgien kommen immer wieder Berichte über einzelne Heilungserfolge. Gut ist mir ein EMBO-Kongress vor ein paar Jahren in Brüssel in einer Militärkaserne in Erinnerung: Ein Mann erzählte, wegen einer nicht heilenden Wunde habe er das Institut aufgesucht und später noch zweimal Postsendungen mit Phagen erhalten, um sich damit zu behandeln. Die Wunde war dann verheilt. Das Publikum nahm den Bericht nicht ernst, schon gar nicht die Vertreter der amerikanischen Gesundheitsbehörde. Schließlich unterliegt die Therapie offener Wunden strengsten Sicherheitsauflagen, und das Institut in Tiflis macht keine systematischen Studien und oft auch keine Kontrollversuche. Zudem sind die Fallzahlen gering.

Beim 100-jährigen Jubiläum der Phagenentdeckung im Frühjahr 2017 in Paris stellte ein Redner aus den USA den Fall Tom Petterson vor. Der Patient hatte sich in Ägypten eine bakterielle Infektion geholt und in einer kalifornischen Klinik zwei Monate lang im Koma gelegen. Seine Frau, selbst Ärztin, setzte alle Hebel in Bewegung, bis man sie schließlich ans Militär verwies. Dessen Experten gingen »Phagenfischen«: Aus schmutzigen Abwässern isolierten

Die Tricks der Phagen ...

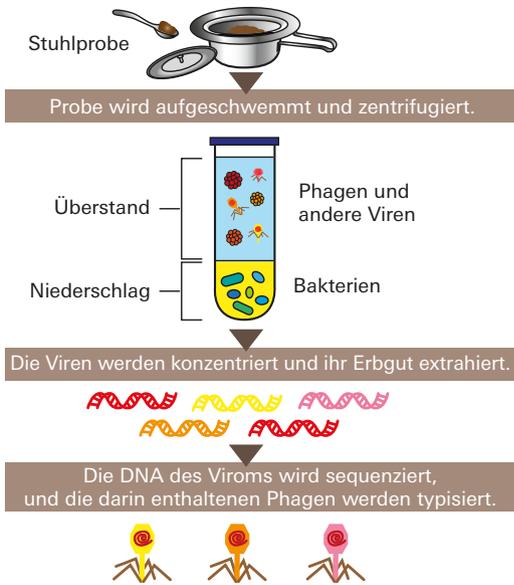
Phagen vermehren sich auf zwei Weisen, lysogen (links) oder lytisch (rechts). Im ersten Fall baut das infizierte Bakterium das Viruserbgut in sein eigenes als »Prophage« ein. Es vervielfältigt dieses nun bei jeder eigenen Teilung mit. Im zweiten Fall vermehrt sich das Virus selbst massenhaft.



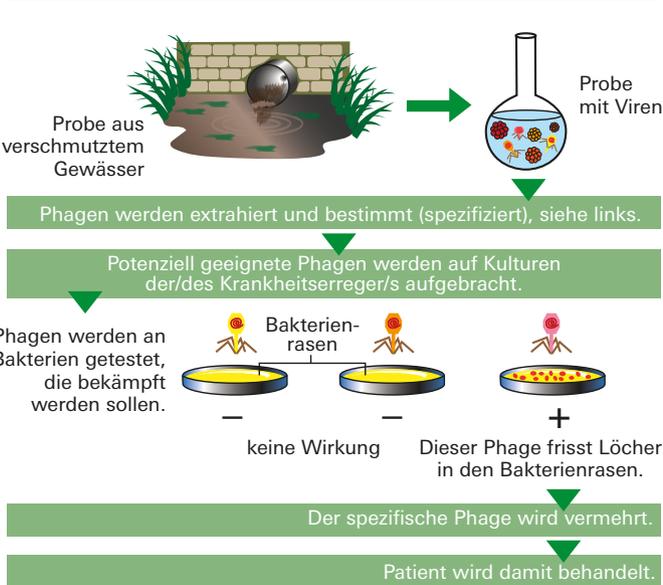
... und wie man ihnen auf die Schliche kommt

Phagen sind mühsam zu gewinnen und noch aufwändiger zu spezifizieren. Aber es gelingt bereits, zumindest das Virom in Stuhlproben zu bestimmen (links). Um Phagen zur Therapie einer bakteriellen Infektion zu finden, fischt man potenzielle Kandidaten meist aus Tümpeln oder Abwässern (rechts).

BESTIMMEN DES VIROMS IM STUHL



VIREN FÜR PHAGENTHERAPIE GEWINNEN



sie 20 Proben, filterten die darin enthaltenen Phagen heraus, vermehrten sie und testeten im Labor, ob einige davon die betreffenden Bakterien auflösten. Es handelte sich um den Bakterienstamm *Acinetobacter baumannii*, der auch als gefährlicher Krankenhauskeim auftritt, so 2015 in Kiel, und nun Kieler Keim heißt. Im Fall Petterson züchtete man die vier wirksamsten Phagentypen in größeren Mengen und verabreichte sie dem Kranken mehrmals direkt in eine Vene! Nach einer Woche öffnete der Mann wieder die Augen. Einige Zeit später nahm er sogar an einer Demonstration für die Forschung in den USA teil. Nach meinen Beobachtungen zeigen Militärmediziner besonderes Interesse an Phagenbehandlungen. Zumindest sieht man auf Kongressen zum Thema immer einige von ihnen.

Für Phagentherapien nach den hier zu Lande gebotenen Sicherheitskriterien bestehen einige nicht leicht überbrückbare Hindernisse. Denn im Gegensatz zu chemisch definierten Medikamenten handelt es sich dabei um jeweils extra herzustellende und schwer charakterisierbare biologische Präparate. Diese Viren können sich außerdem verändern, und nur die lytische Form, die Bakterien zerstört, kommt für eine Behandlung in Frage. Letzteres ließe sich zwar heute gut kontrollieren, doch können Bakterien gegen Phagen resistent werden. Die Vorschriften für Medikamentenprüfungen in der EU und den USA fordern genau definiertes, identisches Ausgangsmaterial, was hier nicht möglich ist, weil man die Phagen spezifisch auf die Keime jedes einzelnen Patienten abstimmen muss.

Kleine Lichtblicke gibt es dennoch, auch wenn die Hürden bisher überwiegen. In der EU wurde 2013 das Projekt »Phagoburn« ins Leben gerufen, an dem neben mehreren französischen Firmen auch elf Forschungsinstitute und Kliniken in Frankreich, Belgien und der Schweiz teilnehmen. Es geht darum, großflächige Brandwunden zu behandeln. Die Forscher wählten zwei in solchen Fällen

aufweisen. Immerhin wurde die Laufzeit des Projekts um drei Jahre verlängert.

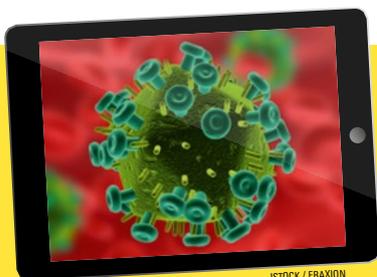
Der Virologe Harald Brüssow von der Firma Nestlé in Lausanne leitete eine Studie, in der durchfallkranke Kinder in Bangladesch mit dem Phagen T4 behandelt wurden. Oft ist der Erreger *Escherichia coli* die Ursache von Durchfall, und bei Schweizer Kindern hatte die Maßnahme Erfolg gehabt. Nicht so jedoch in Bangladesch. Vermutlich tragen die Kinder dort mehr und andere Keime. Dies zeigt, wie wenig wir bisher über die Darmflora besonders von Men-

Über die Zusammensetzung der Darmflora, besonders in der Dritten Welt, weiß man noch zu wenig

schen in Ländern der Dritten Welt wissen. Eine Reihe von Forschungsinstituten befasst sich nun mit der Frage.

Zu meinen eindrucksvollsten Kongresserlebnissen zählt ein amerikanischer Vortrag über Phagenheilungen von Gangränen, also Nekrosen der Füße und Beine. Werden die Zehen oder ganzen unteren Gliedmaßen etwa bei Übergewicht und Diabetes nicht mehr richtig durchblutet, können tief entzündete Wunden auftreten, die unter Umständen bis zum Knochen reichen und nicht heilen. Wegen der Mangel durchblutung gelangen Antibiotika nicht dorthin – oft bleibt nur die Amputation. Mit Sondererlaubnissen wurden in den USA Betroffene im Rahmen einer systematischen Studie namens »PhagoPied« mit Phagencocktails gegen *Staphylococcus aureus* behandelt. Bei dem Vortrag sahen wir gruselige Bilder der brandigen Zehen von einem Dutzend Patienten – und dann Fotos derselben Zehen zwei Monate später: Bei allen waren die Wunden zugeheilt. Amputationen erübrigten sich.

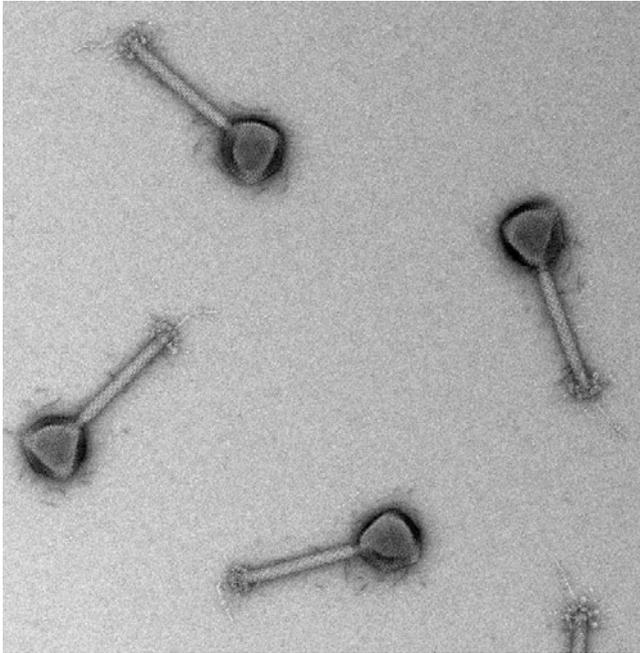
Ein zentrales Ergebnis unserer gründlichen Untersuchungen zur eingangs geschilderten Stuhlübertragung ist: Gesunde Darmbakterien schützen vor krank machenden. Bei der Patientin konnten wir danach keine *Clostridium difficile*-Keime mehr finden. Die anderen hatten sie offensichtlich verdrängt. Ein Kennzeichen eines gesunden Mikrobioms im Darm ist seine Vielfalt. Deren Verlust steht für krankhafte Verhältnisse. Das gilt allem Anschein nach sogar für Übergewicht. Ähnlich wie bei einer Algenblüte Bakterien bei einem hohen Nährstoffangebot zu stark wachsen und schließlich der Dichtestress ihre Viren auf den Plan ruft, so reagieren auch die Bakterien und ihre Phagen im Darm auf allzu lukullische Bedingungen: Die Phagen reduzieren dann nicht nur kräftig die Zahl der Bakterien, sondern leider ebenfalls die der Arten, somit ihre Komplexität. Lediglich etwa ein Fünftel der gesunden Vielfalt bleibt übrig, und normale Verhältnisse bauen sich von allein nicht so leicht wieder auf. Da ist es kein Wunder, dass Übergewichtige, denen es mühsam gelungen ist, abzunehmen, danach schnell wieder an Gewicht zulegen: der bekannte Jo-Jo-Effekt. In Tierstudien wurden dicke Mäuse dünner, wenn sie den Käfig mit schlanken



Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

gefährliche, hartnäckige Keime aus: *Pseudomonas aeruginosa* und *Escherichia coli*. In Abwässern eines Pariser Spitals suchten sie nach passenden Phagen, denn darin befinden sich außer Bakterien stets auch viele ihrer Viren. Jeweils etwa ein Dutzend Typen testeten sie dann im Labor. Doch die Behandlungen der ersten Patienten schlugen fehl, weil andere vorhandene Bakterienarten ungehindert weiterwucherten. Trotzdem verlangen die Vorschriften, jeden Phagen möglichst einzeln zu prüfen und genau zu definieren. Es erweist sich als schwierig, genügend Patienten zu finden, die nur die beiden genannten Keime



Diese T4-ähnlichen Phagen haben durch das Nachweisverfahren die Beine verloren. Am Schwanzende tritt etwas DNA aus. Die Schatten entstehen durch die Färbemethode.

Artgenossen teilen, aber nicht umgekehrt. Denn Nager fressen Kot und nehmen damit Bakterien auf (siehe auch »Übergewicht durch Darmflora«, **Spektrum** Februar 2016, S. 28). Stuhlübertragungen wegen Übergewichts sind beim Menschen aber bisher nicht erlaubt.

Auch die Durchschlagskraft eines Antibiotikums muss man heute oft erst spezifisch austesten

Antibiotika sind längst keine Wunderwaffe mehr gegen krankheitserregende Bakterien. Inzwischen muss man vor einer Verabreichung oft erst prüfen, ob das Mittel bei einer Infektion überhaupt noch wirkt oder ob der Keim schon dagegen resistent ist, was den Beginn einer Behandlung hinauszögern kann. Gerade bei problematischen Erregern könnten gezielt angezüchtete Phagen eine Alternative darstellen. Wenn sie anschlagen, vernichten sie die Bakterien – und zwar nur die unerwünschten – und verschwinden dann, ohne dass sie Nebenwirkungen hervorrufen wie oft Antibiotika. Doch sie dürfen bei uns bisher nur im Ausnahmefall und mit spezieller Genehmigung wie bei Tom Petterson eingesetzt werden.

Leider haben mich Gespräche zu den Aussichten von Phagentherapien hier zu Lande bisher eher entmutigt. Interessierte Firmengründer beklagen, dass fehlende Patentabsicherungen für solche sich ändernden »Naturprodukte« und die zu lange bekannten Phagen potenzielle Investoren abhalten; Maximilian Pichlmaier, der an der Universitätsklinik Hannover Phagenbehandlungen durchführte und heute an der LMU München arbeitet, gab vor allem wegen der erforderlichen Versicherungen bald wieder auf. Beim Paul-Ehrlich-Institut im hessischen Langen (dem Deutschen Bundesinstitut für Impfstoffe und

biomedizinische Arzneimittel, das auch die deutsche Zulassungsbehörde ist) sagte man mir, dass die üblichen strengen Vorschriften bis auf Weiteres gelten. Allerdings hofft die Behörde dringend auf mutige Vorstöße und systematische Studien von Forschern auf diesem Gebiet. Wohl nur stichhaltige Ergebnisse könnten die Vorgaben für die Zulassung von Arzneimitteln auf lange Sicht auch auf Phagentherapien ausdehnen.

Der Anwendungsbereich wäre riesig: Die Cholera grassiert in einigen Ländern. Infizierte Bäuche und vor allem offene Wunden ließen sich behandeln. Mein erstes Ziel wären Druckwunden von bettlägerigen Patienten. Doch der bürokratische Aufwand dafür wäre enorm, angefangen bei den einzureichenden Anträgen über die Ausgangsmaterialien, die im Einzelfall akribisch gewonnen werden müssen, bis zu den klinischen Protokollen vor, während und nach einer Behandlung. Vielleicht sollte man daher zunächst sozusagen klein anfangen mit aus Phagen gewonnenen, klar definierten Reinigungsprodukten, die Bakterien etwa in Operationssälen oder auf Kathetern abtöten.

Die niederländische Firma Microeos in Wageningen versucht in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich, aus Phagen Extrakte – Lysine – zu isolieren, die Bakterien auflösen würden. Sie vertreibt bereits ein Produkt gegen Hautirritationen, das den Keim *Staphylococcus aureus* vernichtet. Das ist immerhin ein Anfang.

Eigentlich darf man sich über die Vorherrschaft der Mikroben, also inklusive der Viren, in der Welt und in unserem Körper, ja selbst über ihre vielen Spuren in unserem Genom nicht wundern. Mikroorganismen waren seit Anbeginn des Lebens und während der gesamten Evolution immer dabei, seit 3,8 Milliarden Jahren. Die ersten Vielzeller traten vor nicht einmal einer Milliarde Jahren auf. Frühe Menschenarten erschienen erst vor gut zwei Millionen Jahren. All unsere Vorfahren mussten sich mit den Winzlingen auseinandersetzen und sich an sie anpassen – wer das nicht vermochte, ging zu Grunde. ◀

QUELLEN

Fish, R. et al.: Bacteriophage Treatment of Intransigent Diabetic Toe Ulcers: A Case Series. In: *Journal of Wound Care* 25, S. 27–33, 2016

D'Hérelle, F.: Sur un microbe invisible antagoniste des bacilles dysentériques. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences* 165, S. 373–375, 1917; On an Invisible Microbe Antagonistic Toward Dysenteric Bacilli. In: *Research in Microbiology* 58, S. 553–554, 2007

Moelling, K., Broecker, F.: Fecal Microbiota Transplantation to Fight *Clostridium difficile* Infections and other Intestinal Diseases. In: *Bacteriophage* 6, e1251380, 2016

Sarker, S. A. et al.: Oral Application of *Escherichia coli* Bacteriophage: Safety Tests in Healthy and Diarrheal Children from Bangladesh. In: *Environmental Microbiology* 19, S. 237–250, 2017

LITERATURTIPPS

Mölling, K.: Supermacht des Lebens. Reisen in die erstaunliche Welt der Viren. C.H.Beck, München 2015
Lebendig, spannend und gut verständlich erzählte Forschung

Moelling, K.: Viruses. More Friends than Foes. World Scientific Publishing, Singapur 2017
Erweiterte und aktualisierte englische Fassung der deutschen Ausgabe

GENETIK

DIE RÄTSEL DES CRISPR/CAS-SYSTEMS

Alle Welt spricht von dem neuen Genome-Editing-Werkzeug. Doch woher kommt die »Genschere« ursprünglich, in welchen Lebewesen ist sie zu finden, und welche Funktionen erfüllt sie in der Natur?



Heidi Ledford ist Chefreporterin bei der Fachzeitschrift »Nature« in London.

» spektrum.de/artikel/1496901

Francisco Mojica kann sich noch gut an den Tag im Jahr 1992 erinnern, an dem er erstmals einen Eindruck vom CRISPR/Cas-System bekam – jenem Immunmechanismus von Bakterien und Archaeen, der 20 Jahre später eine Revolution in der Biotechnologie lostreten sollte. Mojica war damit beschäftigt, Genomsequenzen der Salz liebenden Mikrobe *Haloferox mediterranei* auszuwerten, die zu den Archaeen gehört. Dabei fielen ihm 14 ungewöhnliche DNA-Sequenzen auf, die jeweils 30 Nukleotide lang waren. Ob vorwärts- oder rückwärtsgelesen – sie sahen immer mehr oder weniger gleich aus. Und sie wiederholten sich in einem Abstand

von etwa 35 Nukleotiden. Wenig später fand Mojica noch mehr von ihnen. Der Forscher war fasziniert und stellte die mysteriösen Sequenzen ins Zentrum seiner Forschung, die er an der spanischen Universidad de Alicante betrieb.

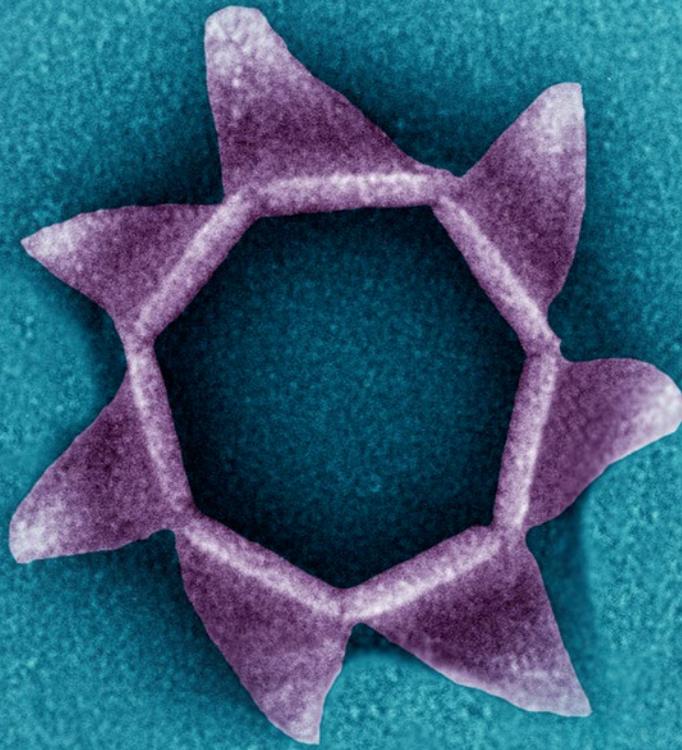
Eine populäre Entscheidung war das nicht. Das Labor des Mikrobiologen musste jahrelang mit kargen Finanzmitteln zurechtkommen. Auf Tagungen trat er an bedeutende Forscher heran und fragte sie, was sie von den kurzen, sich wiederholenden Sequenzen hielten. »Vergeuden Sie nicht zu viel Zeit damit«, warnten sie ihn, »es gibt so viele repetitive DNA-Sequenzen in so vielen Organismen – wer kann schon sagen, was es damit auf sich hat?«

Mittlerweile können wir eine Menge darüber sagen. Was Mojica seinerzeit in den Bann zog, bezeichnen wir heute als gehäuft auftretende, in regelmäßigen Abständen angeordnete, kurze palindromische Wiederholungen (clustered, regularly interspaced palindromic repeats, kurz CRISPR; als »palindromisch« bezeichnet man DNA-Abschnitte, wenn ihre beiden Stränge gegenläufig die gleiche Sequenz aufweisen). Sie gehören zum so genannten CRISPR/Cas-System, das Mikroorganismen dabei hilft, eindringende Viren zu zerstören. Die meisten Biologen und Mediziner wissen inzwischen zu schätzen, wie gut sich mit dem System – insbesondere seiner Version CRISPR/Cas9 – Gensequenzen verändern lassen.

Doch Mojica und andere Mikrobiologen rätseln noch immer über grundlegende Fragen: Wie ist das System im Lauf der Evolution entstanden, und wie hat es die Entwicklung der Mikroorganismen geprägt? Warum nutzen manche Mikroben es, andere dagegen nicht? Und erfüllt

AUF EINEN BLICK JENSEITS DER REVOLUTION

- 1 Das CRISPR/Cas-System revolutioniert seit einigen Jahren die Gentechnik. Es ist einfacher zu handhaben, billiger und flexibler als frühere Methoden des Genome Editing.
- 2 Die öffentliche Debatte dreht sich meist um die biotechnologischen Anwendungen des Systems. Nicht minder interessant sind aber die damit verbundenen grundlegenden biologischen Fragen.
- 3 Forscher haben bereits eine Menge über CRISPR/Cas herausgefunden, doch es gibt noch viele Geheimnisse zu lüften.



SIRV-2-Viren befallen Wärme liebende Archaeen. Sie verlassen ihre Wirtszellen auf ungewöhnliche Weise. Ein virales Protein bildet eine siebenseitige Pyramide auf der Zelloberfläche, die sich wie eine Blüte öffnet und die reifen Virenpartikel entlässt (eingefärbte elektronenmikroskopische Aufnahme). Mit CRISPR/Cas-Systemen wehren sich die Zellen gegen solche infektiösen Partikel.

TESSA OUAÏ, DAVID PRANGISHVILI, GÉRARD PEHAU-ARNAUDET, JEAN-MARC PANAUD, INSTITUT PASTEUR

es möglicherweise noch weitere biologische Funktionen als die, die man schon kennt?

»CRISPR/Cas hat viel Aufmerksamkeit in den Medien bekommen, hauptsächlich wegen seiner Verwendung als Genome-Editing-Werkzeug – und das aus gutem Grund, schließlich liegt hierin eine außerordentlich große gesellschaftliche Bedeutung«, sagt Jennifer Doudna, Molekularbiologin an der University of California in Berkeley. Sie gehörte zu den ersten Wissenschaftlerinnen, die das biotechnologische Potenzial von CRISPR/Cas erkannten. »Doch kaum weniger spannend sind die vielen grundsätzlichen Fragen zur einschlägigen Biologie, die immer noch einer Antwort harren.«

Woher kommt CRISPR/Cas?

Die evolutionären Vorteile dieses molekularen Systems liegen auf der Hand. Bakterien und Archaeen, die beide zu den Prokaryoten zählen, müssen sich ständig gegen Angriffe von Eindringlingen wehren. Viren beispielsweise übertreffen Prokaryoten zahlenmäßig mindestens um das Zehnfache – und vernichten schätzungsweise alle zwei Tage die Hälfte sämtlicher Mikroben auf dem Planeten (Letztere vermehren sich natürlich immer wieder, so dass sie nicht verschwinden). Hinzu kommen parasitische DNA-Plasmide, die per interzellulärem Austausch von einem Mikroorganismus zum anderen wechseln, ihrem Wirt wichtige Ressourcen stehlen und ihn zur Selbstzerstörung zwingen, falls er versucht, sie wieder loszuwerden.

Im Zuge der Evolution haben die Prokaryoten ein ganzes Arsenal von Waffen entwickelt, um solchen Bedrohungen zu begegnen. Mit bestimmten Proteinen, den Restri-

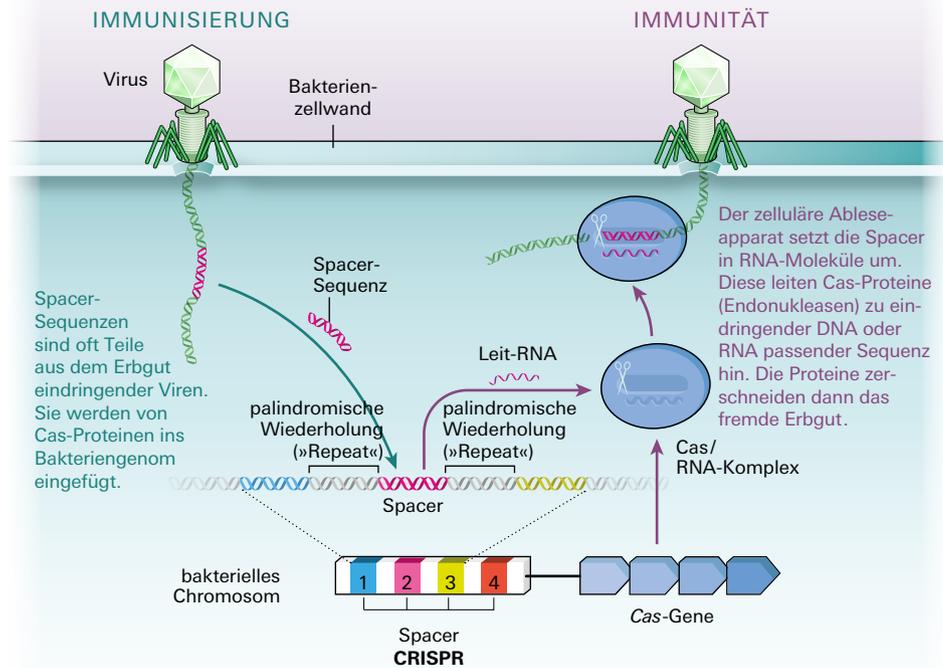
tionsenzymen, zerschneiden sie etwa fremde DNA. Aber das ist häufig ein stumpfes Schwert, denn jedes Restriktionsenzym erkennt lediglich eine spezifische Sequenz, und ein Mikroorganismus kann sich nur dann vor einem Schädling schützen, wenn er das dazu passende Enzym besitzt.

Verglichen damit erweist sich CRISPR/Cas als wesentlich flexibleres Verteidigungssystem. Es passt sich an Eindringlinge an und erinnert sich später wieder an sie – und zwar auf ähnliche Weise, wie menschliche Antikörper nach einer Infektion für lang anhaltende Immunität sorgen. Mojica und andere erkannten, dass die DNA-Sequenzen zwischen den palindromischen Wiederholungen, die »Spacer«, manchmal mit Abschnitten im Erbgut von Viren übereinstimmen. Es stellte sich heraus: Kommt eine Mikrobe mit Viren oder Plasmiden in Kontakt, fügen einige ihrer Proteine kurze Stücke aus deren DNA-Sequenz als Spacer ins Zellgenom ein. Diese Proteine stehen mit CRISPR in Zusammenhang und werden deshalb als Cas-Proteine bezeichnet (von »CRISPR-associated«). Der zelluläre Ableseapparat der Mikrobe setzt die eingefügten Spacer in RNA-Moleküle um, die ihrerseits dazu dienen, andere Cas-Proteine zu Eindringlingen passender Sequenz hinzuleiten. Die Cas-Proteine zerschneiden das fremde Erbgut dann (siehe »Dauerhafter Schutz«, S. 52).

Wie kommt es, dass Bakterien und Archaeen einen solch raffinierten Abwehrmechanismus besitzen? Das ist nicht abschließend beantwortet, aber vermutlich stammt das System von Transposons ab: »springenden Genen«, die ihre Position im Genom verändern können. Der Evolutionsbiologe Eugene Koonin von den US-amerikanischen National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) und sein Team

Dauerhafter Schutz

Etwa 90 Prozent der bekannten Archaeen und gut ein Drittel der Bakterien besitzen irgendeine Form von CRISPR/Cas-System. Es besteht oft aus gehäuft auftretenden, kurzen DNA-Wiederholungssequenzen mit Spacer-Sequenzen dazwischen sowie aus einigen Genen, die für CRISPR-assoziierte Proteine (Cas-Proteine) kodieren.



haben eine Klasse von Transposons entdeckt, die für das Protein Cas1 kodieren, welches am Einbau der Spacer ins mikrobielle Genom mitwirkt. Diese »Casposons« stellen vielleicht den Ursprung des CRISPR/Cas-Systems dar.

Wie funktioniert CRISPR/Cas?

Forscher wissen schon viel darüber, wie Cas-Proteine die Spacer einfügen – doch längst nicht alles. So ist die DNA von Viren chemisch beinahe identisch mit jener der Wirtszelle. Woher wissen die Cas-Proteine, welches in der Zelle herumschwimmende DNA-Stück sie in das CRISPR/Cas-Gedächtnis einbauen sollen? Fügen sie einen Abschnitt der zelleigenen DNA hinzu, wird sich die Abwehrreaktion gegen die Wirtszelle selbst richten – eine Autoimmunreaktion mit potenziell tödlichen Folgen.

Der Mikrobiologe Rodolphe Barrangou von der North Carolina State University in Raleigh vermutet, dass solche Fehler durchaus vorkommen, aber nicht die Gesamtpopulation der Wirtszellen auslöschen. Ein paar tödliche Versehen fallen wohl nicht ins Gewicht, wenn dafür andere Zellen einen Virenangriff überstehen und anschließend immunisiert sind.

Wenn Viren eine Bakterienpopulation befallen, erwirbt oft nur eine von zehn Millionen Zellen einen Spacer, mit dem sie sich anschließend erfolgreich verteidigen kann. Das erschwert es, die Details des Vorgangs aufzuklären. Dabei wäre es nützlich, mehr darüber zu erfahren und etwa dafür zu sorgen, dass bestimmte Spacer häufiger eingefügt werden. Forschungsarbeiten haben gezeigt: Zellen mit funktionierendem CRISPR/Cas-System können DNA- und RNA-Sequenzen speichern, mit denen sie in Kontakt kommen.

Hier eröffnet sich die Möglichkeit, zelluläre Automaten zu konstruieren, die Umwelteinflüsse aufzeichnen.

Forscher wüssten auch gern, warum CRISPR-assoziierte Sequenzen häufig wieder aus dem Zellgenom verschwinden. Die meisten Mikroorganismen, die über ein CRISPR/Cas-System verfügen, besitzen nur wenige Dutzend Spacer – manche sogar lediglich einen einzigen. Der krasse Gegensatz dazu ist *Sulfolobus tokodaii*, ein Vertreter der Archaeen, dessen fünf CRISPR/Cas-Systeme rund ein Prozent seines gesamten Genoms belegen und 458 Spacer enthalten.

Der Selektionsdruck, alte Spacer beizubehalten, dürfte eher schwach sein. Wenn ein Virus mutiert, so dass die Sequenz seines Erbguts nicht mehr mit derjenigen des entsprechenden Spacers übereinstimmt, können sich die potenziellen Wirtszellen nicht mehr vor dem Virus schützen. Der Spacer wird dann überflüssig und für die Zelle zum genetischen Ballast.

Welche Funktionen könnte CRISPR/Cas noch haben?

Bei vielen Spacern ist rätselhaft, woher sie stammen. Nicht einmal drei Prozent der bisher untersuchten stimmen mit bekannten DNA-Sequenzen in Datenbanken überein. Das könnte unserem begrenzten Wissen geschuldet sein: Bislang haben Forscher vor allem solche Viren analysiert, die Menschen, Nutztiere oder Nutzpflanzen infizieren – kaum aber solche, die Bakterien oder gar Archaeen befallen. Möglich erscheint auch, dass manche Spacer die »Geister« längst nicht mehr existierender oder bis zur Unkenntlichkeit mutierter infektiöser Partikel sind.

Besonders fasziniert die Forscher ein dritter Aspekt. Wie sich herausgestellt hat, gibt es bakterielle CRISPR/

Cas-Systeme, die nicht nur genetische Eindringlinge abwehren, sondern darüber hinaus die DNA-Reparatur, die Genexpression und die Bildung von Biofilmen kontrollieren. Sie können zudem die Infektiosität von Bakterien beeinflussen: *Legionella pneumophila*, der Erreger der Legionärskrankheit, benötigt das Protein Cas2, um Amöben zu befallen, die seine natürlichen Wirte sind. Es stellt sich die Frage, in welchem Umfang die Funktionen von CRISPR/Cas-Systemen über die reine Schädlingsabwehr hinausgehen. Hier gibt es interessante Parallelen zur RNA-Interferenz, einem Vorgang, der es Lebewesen mit Zellkern erlaubt, ihre Gene abzuschalten. Von ihm dachten Forscher anfangs ebenfalls, er sei vorrangig ein Abwehrmechanismus; erst später fiel auf, dass er an der Steuerung der Genexpression mitwirkt.

Laut dem Mikrobiologen Stan Brouns von der Technischen Universität Delft (Niederlande) können CRISPR/Cas-Strukturen wohl alle möglichen DNA-Sequenzen als Spacer aufnehmen. Manchmal entstünden dabei neue, nützliche Funktionen, manchmal gingen die Zellen daran zu Grunde.

Warum nutzen nur manche Mikroben CRISPR/Cas?

Schätzungen zufolge besitzen mehr als 90 Prozent der Archaeen ein CRISPR/Cas-basiertes Abwehrsystem, während es bei den bisher sequenzierten Bakterien lediglich rund 30 Prozent sind. Bei Eukaryoten, also Lebewesen mit Zellkern, hat man CRISPR/Cas bislang überhaupt noch nicht gefunden, nicht einmal bei Einzellern.

Nanoarchaeum equitans ist ein Organismus aus der Domäne der Archaeen, der in nahezu kochendem Wasser auf anderen Archaeen parasitiert. Er hat sich vieler Gene entledigt, die mit dem Energiehaushalt und der allgemeinen Zellorganisation zu tun haben. Doch selbst sein winziges Genom, dessen Sequenz gerade einmal 490 000 Nukleotide umfasst, hat ein CRISPR/Cas-System mit ungefähr 30 Spacern. Anscheinend ist es sogar für diesen Zwergorganismus unverzichtbar – warum es dann in Eukaryoten komplett fehlt, bleibt zu klären.

Möglicherweise fördern extreme Umweltbedingungen den Unterhalt eines CRISPR/Cas-Systems, weil sie kaum andere Verteidigungsmethoden zulassen. Bakterien entziehen sich Eindringlingen oft, indem sie Mutationen in jenen Sequenzen erwerben, die für Proteine an ihrer Oberfläche kodieren. Extremophilen Archaeen könnte dieser Weg versperrt sein, da ihre Oberflächenproteine weniger Freiheiten haben, sich zu verändern, ohne dass die Zellen dabei ihre Lebensfähigkeit einbüßen.

Es dürften noch weitere Faktoren eine Rolle spielen. *Mycoplasma gallisepticum* beispielsweise, ein Krankheitserreger bei Vögeln, verlor seine CRISPR/Cas-Ausstattung, als er von Hühnern auf Wildfinken übersprang. Warum das System in dem alten Wirt anscheinend nützlich war, in dem neuen aber plötzlich nicht mehr, ist ein Rätsel.

Mathematische Modelle und vorläufige experimentelle Befunde deuten darauf hin, dass CRISPR/Cas vor allem dann Vorteile bringt, wenn ein Organismus sich nur mit wenigen Virustypen auseinandersetzen muss. Denn das System kann bloß eine begrenzte Zahl viraler Sequenzen

speichern, bevor die damit einhergehende zusätzliche DNA-Menge für den Organismus zur Belastung wird. Übersteigt die Vielfalt der Viren in der Umwelt die Zahl der möglichen Spacer bei Weitem, nutzt CRISPR/Cas vermutlich nur noch wenig.

Wie viele CRISPR/Cas-Varianten gibt es?

Öffentliche Debatten drehen sich meist um das System CRISPR/Cas9 – zu Recht, denn es ist vergleichsweise einfach zu handhaben, kostengünstig und vielseitig. Mikroorganismen jedoch haben keine Vorlieben. Sie nehmen neue Systeme von anderen Mikroben auf, vermischen sie mit ihren eigenen und entledigen sich dabei alter Elemente.

Forscher unterscheiden zwischen sechs CRISPR/Cas-Typen, die sich in 19 Untertypen gliedern. Nur bei einigen davon ist geklärt, wie sie funktionieren. CRISPR/Cas9 etwa ist ein System des Typs II, das die Spacer-Sequenzen in RNA-Moleküle umsetzt, die dann ihrerseits ein Enzym (eine Endonuklease) zu eindringender Fremd-DNA hinleiten, so dass es diese zerschneidet (siehe auch **Spektrum** September 2015, S. 22). Systeme des Typs VI dagegen funktionieren mit Enzymen, die RNA statt DNA zerlegen. Und solche des Typs IV enthalten zwar einige Gene, die mit CRISPR/Cas in Zusammenhang stehen, ihnen fehlen aber die palindromischen Wiederholungen und der Apparat zum Einbau der Spacer.

Typ-III-Systeme treten in der Natur am häufigsten auf und sind am wenigsten verstanden. Die bisherigen Befunde deuten darauf hin, dass sie nicht direkt auf eindringende DNA oder RNA reagieren, sondern auf den Prozess des Umschreibens von DNA in RNA, die so genannte Transkription. Falls das stimmt, würde es neue Möglichkeiten des Genome Editing eröffnen, wie Doudna betont. Möglicherweise harren noch weitere Systeme ihrer Entdeckung, insbesondere da Forscher nicht mehr nur in Mikroben nach ihnen suchen, welche in Kulturen gezüchtet wurden, sondern auch in DNA-Proben aus der Umwelt (»environmental DNA«).

Mojica hält es für reizvoller, die biologischen Grundlagen der CRISPR-Systeme zu erforschen, als ihre biotechnologischen Anwendungen weiterzuentwickeln. Viele seiner Kollegen wundern sich darüber, zumal für Letzteres wesentlich mehr Mittel bereitstehen. Doch Mojica bleibt dabei: »Ich weiß, dass es ein großartiges Biotechnologie-Werkzeug mit großem medizinischem Potenzial ist – und dennoch interessiert mich mehr, wie es funktioniert.« ◀

QUELLEN

Nuñez, J. K. et al.: Integrase-Mediated Spacer Acquisition during CRISPR-Cas Adaptive Immunity. In: *Nature* 519, S. 193–198, 2015

Shipman, S. L. et al.: Molecular Recordings by Directed CRISPR Spacer Acquisition. In: *Science* 353, aaf1175, 2016

Westra, E. R. et al.: Parasite Exposure Drives Selective Evolution of Constitutive versus Inducible Defense. In: *Current Biology* 25, S. 1043–1049, 2015

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 541, S. 280–282, 12. Januar 2017

ENERGIEPOLITIK KLIMAFAKTOR INDIEN

Der indische Subkontinent spielt eine entscheidende Rolle für die Zukunft der globalen Erwärmung. Nur wenn sich Indiens Energiepolitik dramatisch ändert, können die weltweit anvisierten Klimaziele erreicht werden.

» spektrum.de/artikel/1496903

Der Smog, den vor allem Dieselfahrzeuge verursachen, überzieht Neu-Delhi mit einem gesundheitsschädlichen Schleier. Von den 20 am meisten smogbelasteten Städten der Welt liegen 10 in Indien.





Varun Sivaram gehört dem Council of Foreign Relations an, einer privaten Denkfabrik mit Sitz in New York und Washington. Er leitet deren Program on Energy Security and Climate Change. Zudem ist er außerordentlicher Professor an der Georgetown University in Washington.

Bei der Pariser UN-Klimakonferenz von 2015 diente ein glitzernder Wasserfall als Blickfang für den indischen Pavillon. Drinnen verkündeten Multimedia-Präsentationen und prominente Diskussionsrunden, dass Indien schon bald nur noch saubere Energie produzieren werde. Premierminister Narendra Modi ging noch weiter. Er erklärte sein Land zum Anführer einer neuen International Solar Alliance – eines Solarbündnisses mit dem Ziel, in 120 Ländern die Sonnenenergie zu fördern. Das offizielle Indien präsentierte sich als Vorreiter im Kampf gegen den globalen Klimawandel.

Ich kam damals gerade von einer Forschungsreise quer durch Indien zurück und hatte Mühe, den kühnen Optimismus mit den dort beobachteten Tatsachen zu vereinbaren: überall Kohlekraftwerke, ein störanfälliges Strom-

Die fossilen Brennstoffe sind nominell billig, fordern aber einen hohen Tribut

netz, das von nennenswerten Mengen zusätzlicher Wind- oder Solarenergie hoffnungslos überfordert wäre, und die verbreitete Meinung, Indien sei als Entwicklungsland nicht verpflichtet, seine CO₂-Emissionen zu reduzieren, sondern dürfe mit fossiler Energie wachsen wie die großen Industrienationen vormals auch.

Dennoch unterzeichnete Indien zusammen mit 194 anderen Staaten das Pariser Klimaabkommen, das die Welt verpflichtet, die globale Erwärmung auf zwei Grad Celsius zu begrenzen. Im November 2016 trat das Abkommen in Kraft und wurde nach internationalem Recht für jedes der beteiligten Länder bindend – also auch für Indien. Nur US-Präsident Donald Trump kündigte Anfang Juli 2017 die Absicht an, von der Pariser Übereinkunft zurückzutreten.

Trotz der pathetischen Rhetorik hat die indische Regierung höchst unklare Vorstellungen von einer durch saubere Energie geprägten Zukunft. Zwar setzt sich Indien ehrgeizige Ziele für die Nutzung von Sonne und Wind, verpflichtet sich aber nur unzureichend, seinen CO₂-Ausstoß insgesamt zu reduzieren. Selbst wenn die Regierung gar nichts unternimmt und zusieht, wie die Emissionen rapide steigen, bleiben diese im Rahmen der enorm hohen Grenzwerte, die sich das Land in Paris genehmigt hat.

Das wäre eine Katastrophe für das Weltklima. Indien zählt zu den am schnellsten aufstrebenden großen Wirt-



GETTY IMAGES / LIGHT ROCKET / JONAS GRATZER

schaftsmächten. Seine Bevölkerung wird bis 2040 auf rund 1,6 Milliarden ansteigen, und der Strombedarf dürfte sich vervierfachen. Ohne drastische Gegenmaßnahmen wird das Land in der Jahrhundertmitte wahrscheinlich der größte Treibhausgasproduzent weltweit sein – gegenwärtig belegt es noch den dritten Platz hinter China und den USA – und damit alle Bemühungen zunichtemachen, den globalen Klimawandel zu bremsen. Denn sollte Indien seinen sprunghaft ansteigenden Energiehunger nur mit Kohlekraft stillen, wird sich sein Ausstoß von Treibhausgasen bis 2040 verdoppeln.

Dabei wäre das überhaupt nicht nötig, denn energiepolitisch ist Indien ein fast unbeschriebenes Blatt. Während in den alten Industrieländern die Aufgabe darin besteht, die traditionelle fossile Basis durch erneuerbare Energien zu ersetzen, verfügt Indien noch gar nicht über eine derart ausgebaute Infrastruktur. Ein Entwicklungsland hat die Wahl, von vornherein in Wind, Sonne und Erdgas zu investieren statt in Kohle (siehe »Energierévolution für Afrika«, **Spektrum** Mai 2017, S. 72–76). Zudem können sparsamere Geräte, Fabriken und Fahrzeuge den Energiebedarf zügeln und den Einsatz sauberer Quellen erleichtern. Was wäre nötig, um Indien auf diesen Pfad zu führen? Und welche energiepolitischen Entscheidungen hätten katastrophale Folgen für unseren Planeten?

Von schmutzigen Quellen zu sauberem Strom

Derzeit prägen umweltschädliche Quellen Indiens Energiemix. Zwei Drittel der Haushalte heizen und kochen mit Stroh, Holzkohle, Brennholz oder getrockneten Kuhfladen. Das deckt fast ein Viertel des nationalen Primärenergiebedarfs. Den Rest liefern fast ausschließlich Kohle und Öl. Kohlekraftwerke erzeugen drei Viertel des Stroms, und die Hälfte der indischen Fabriken verbrennt Kohle für die Stahlgewinnung und andere Prozesse. Der Transportsektor ist sogar fast komplett auf Erdöl angewiesen.

Die fossilen Brennstoffe sind nominell billig, fordern aber einen hohen Tribut. Sie tragen nicht nur zum Klima-



GETTY IMAGES / LIGHT ROCKET / JONAS GRATZER

Seit Jahrzehnten brennen in den Minen nahe der Großstadt Jharia ungeheure Kohlefeuern, verursacht durch Zigaretten, Blitzschlag oder Selbstentzündung. Sie blasen permanent giftige Gase und Kohlendioxid in die Luft.

wandel bei, sondern auch zur städtischen Luftverschmutzung: 10 der 20 smogreichsten Städte der Welt liegen in Indien. Kohlekraftwerke verbrauchen viel Wasser. Eine wachsende Abhängigkeit von Kohle- und Ölimporten schwächt die Wirtschaft; im Lauf der globalen Ölkrisen wurde die indische Währung stark abgewertet.

Der beste Weg zu moderner und sauberer Energie führt über den Stromsektor. Erneuerbare Stromquellen werden mit fallenden Kosten zunehmend wettbewerbsfähig gegenüber Kohle. Wenn Motorroller, Autos, Busse und Lastwagen künftig mit Strom fahren, ist der Verkehr nicht mehr völlig vom Erdöl abhängig.

Aber das alles ist leicht gesagt. Mehr als 300 Millionen Inder haben überhaupt keinen Zugang zum Stromnetz. Weitere Millionen sind zwar angeschlossen, bekommen aber nur hier und da Strom, weil das Netz in einem erbärmlichen Zustand ist – und gewiss nicht in der Lage, zusätzliche Energie aus Wind und Sonne zu verkraften. Nach heftigen Unwettern bleiben manchmal tausende Menschen wochenlang ohne Strom, wie ich auf meiner Reise durch Indien erlebte.

Ungeachtet dieser Tatsachen malt Modis Regierung ein verheißungsvolles Bild von der Zukunft. In Paris gelobte sie, den nicht fossil erzeugten Stromanteil von heute 24 Prozent bis 2030 auf 40 Prozent zu erhöhen. Ende 2016 erhöhte Modi seine Prognose sogar auf 60 Prozent – ein wahrhaft ehrgeiziges Ziel. Heutzutage beruht Indiens nichtfossiler Strom vorwiegend auf Wasserkraft, aber die Planung weiterer Wasserkraftwerke droht an vielen Hindernissen zu scheitern: Baugenehmigungen sind schwierig zu beschaffen, für Stauseen müssen große Flächen aufgekauft werden, und das Aushandeln von Entschädigungen für die umgesiedelten Gemeinden schürt politischen Streit. Auch Kernkraftwerke können angesichts chronischer Bauverzögerungen keine führende Rolle übernehmen.

Um ihr 60-Prozent-Ziel zu erreichen, setzt die Regierung deshalb fast ausschließlich auf Sonne und Wind, die bis 2030 rund 350 Gigawatt liefern sollen. Davon würden 250 Gigawatt durch Solarkraft erzeugt; das wären mehr als

80 Prozent der heute weltweit verfügbaren Solarenergie. Dieses Ziel ist zwar kühn, wird aber immer realistischer dank der fallenden Solarkraftkosten: Sie sind in Indien während der vergangenen fünf Jahre um zwei Drittel gesunken. Eine neue Solaranlage ist schon heute billiger als ein neues Kraftwerk, das Importkohle verbrennt, und wird 2020 sogar kostengünstiger sein als eines, das heimische Kohle nutzt. Außerdem investieren die Regierung und ausländische Geldgeber in ein nationales Netz so genannter grüner Korridore. Diese Übertragungswege verbinden sonnige Regionen wie die Wüste Thar im Bundesstaat Rajasthan mit weit entfernten Städten wie Mumbai und Delhi.

Die Regierung setzt sich das ehrgeizige Ziel, die Dächer in Städten, aber auch in entlegenen, nicht ans Stromnetz angeschlossenen Dörfern mit Solarmodulen auszustatten. Zum Vergleich verweist man gern auf das Fernmeldewesen, das einen Riesensprung vom lückenhaften Festnetz zu flächendeckendem Mobilfunk geschafft hat. Ebenso,

AUF EINEN BLICK OHNE INDIEN UNMÖGLICH

- 1** Der Energiebedarf der wachsenden Bevölkerung Indiens nimmt stark zu. Wenn sich der dortige Energiesektor nicht wandelt, bedrohen seine enormen CO₂-Emissionen die globalen Klimaziele.
- 2** Um den CO₂-Ausstoß zu beschränken, muss Indien den Übergang von Kohle zu Erdgas bewältigen und ein zuverlässiges Stromnetz aufbauen, das große Mengen von Wind- und Solarenergie aufnehmen kann.
- 3** Zusätzlich muss das Land Energiesparmaßnahmen einleiten und umweltschonende Verkehrsmittel fördern. Dafür braucht es technische und finanzielle Unterstützung aus dem Ausland.

meint man, könnte Indien in kurzer Zeit zu lokaler Solar-energie übergehen, die ohne nationales Leitungsnetz auskommt. Tatsächlich hat sich die Menge der Solarmodule in jedem der vergangenen vier Jahre fast verdoppelt.

Das mag zwar sein, aber große Fotovoltaik-Freiflächenanlagen sind viel billiger, und ein umfassendes Netz kann moderne Geräte wesentlich besser mit Strom versorgen – und nicht bloß die paar Glühlampen und Ventilatoren, für die ein Solarmodul auf dem Dach ausreicht. Es gilt also, sowohl die zentrale als auch die dezentrale Energieversorgung zu fördern und das Stromnetz auszubauen und zu verbessern. Dabei können einzelne Solarmodule und



FOTOLIA / LAURIN RINDER

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Batterien das gesamte System stabilisieren, indem sie zu einem lokalen Netz – einem Microgrid – verbunden werden, das eine Wohngegend, ein Krankenhaus oder ein Rechenzentrum bedient.

Erdgas hilft – doch Energiesparen entscheidet

Dennoch wird das Angebot an erneuerbarer Energie dem schnell zunehmenden Bedarf nicht nachkommen. Zudem sind verlässliche Energiequellen nötig, die das unvorhersehbare Schwanken bei Solar- und Windkraftanlagen ausgleichen. Vorläufig ist das Speichern in Batterien zu teuer, um das Problem flächendeckend zu lösen.

Als Ausweg bieten sich Gaskraftwerke an: Erdgas verursacht nur halb so viel CO₂-Ausstoß wie Kohle. Derzeit erzeugt es bloß acht Prozent von Indiens Strom, denn die heimische Produktion fällt kaum ins Gewicht, und Importgas ist teuer. Deshalb haben frühere Regierungen lieber auf die reichlich vorhandene heimische Kohle gesetzt. Doch da das weltweite Angebot von Flüssiggas zunimmt, sinken die Preise in Asien rapide.

Gaskraftwerke lassen sich billiger und schneller errichten als Kohlekraftwerke. Zudem können sie ihre Leistung rasch variieren und damit die Schwankungen der erneuerbaren Energien ausgleichen. Erdgas kann an Stelle von Kohle und Öl Gebäude und Fabriken mit Wärme versorgen; es kann sogar Verkehrsmittel antreiben und dadurch die CO₂-Emissionen weiter reduzieren. Vikram Singh Mehta, Leiter der Denkfabrik Brookings India und früher Chef der Firma Shell India, plädiert daher dafür, Indiens Energiepolitik auf Erdgas auszurichten. Das Land müsse massiv in ein eigenes Pipelinennetz für den Gastransport investieren sowie in Terminals für den Flüssiggasimport.

Die Regierung Modi scheint auf Mehta zu hören. Sie versprach im Dezember 2016, weder die öffentliche Hand

noch der Privatsektor würde nach 2022 noch ein einziges Kohlekraftwerk in Auftrag geben; dafür soll mehr Erdgas zum Einsatz kommen.

Aber selbst bei einer konsequenten Hinwendung zu erneuerbaren Energien und Erdgas werden auf mittlere Sicht Kohle und Erdöl den indischen Energiemix prägen. Deshalb sind, wie Navroz Dubash vom Center of Policy Research in Neu-Delhi betont, Investitionen in eine energieeffiziente Wirtschaft entscheidend. Indien könnte zum leuchtenden Vorbild eines Entwicklungslands werden, dessen Wirtschaft wächst, ohne dass gleichzeitig Energieverbrauch und Emissionen durch die Decke gehen.

Nach einer Prognose der Internationalen Energieagentur in Paris wird Indien bei gleichbleibender Effizienz 2040 viermal so viel Strom brauchen wie gegenwärtig, doch eine konsequente Energiesparpolitik kann die Zunahme halbieren. Derzeit verzehrt die Industrie mehr als 40 Prozent des indischen Energieaufkommens. Bei der Produktion von Stahl, Ziegeln und Düngemitteln würden effizientere Maschinen sowie der Übergang von Kohle zu Gas oder Strom enorm viel Energie und Schadstoffe einsparen.

Auch der atemberaubend wachsende Bausektor birgt ein großes Einsparpotenzial. Drei Viertel der Gebäude, die 2040 stehen werden, sind heute noch nicht vorhanden. Entsprechend droht der Stromverbrauch für Wohnungen und Geschäfte vor allem durch die Ausbreitung von Klimaanlagen zu explodieren, wenn die neuen Gebäude nicht Energie sparen.

Bereits heute ist Indien ein Vorreiter bei Maßnahmen zur Kostensenkung von energieeffizienten Produkten. Eine öffentlich-private Partnerschaft namens Energy Efficiency Services Limited, die massentaugliche Geräte billig anbietet, feiert durchschlagende Erfolge. Die Initiative hat bisher mehr als 200 Millionen LED-Energiesparlampen zum Preis herkömmlicher Glühlampen verkauft – somit deutlich billiger als im Westen üblich – und subventioniert nun die Entwicklung effizienter Klimaanlagen. Wenn das Beispiel Schule macht, wird die millionenfache Nachfrage des neu entstehenden Mittelstands nach modernen Dienstleistungen die Produktion sparsamer Geräte ankurbeln.

Indien könnte auch etwas gegen die wachsenden Emissionen des Verkehrssektors unternehmen. Derzeit verbraucht er nur 14 Prozent des nationalen Energieaufkommens, weil sehr wenige Inder ein Auto besitzen, doch bis 2040 dürfte sich die Treibstoffnachfrage infolge höherer Einkommen mehr als verdreifachen. Die politischen Entscheidungsträger verlangen inzwischen bessere Verbrauchswerte bei neu zugelassenen Fahrzeugen. Die indischen Städte sollten darüber hinaus in Ladestationen investieren, um Elektroautos attraktiver zu machen und den Einsatz erneuerbarer Energien im Verkehr zu ermöglichen. Da mehr als 80 Prozent aller in Indien verkauften Fahrzeuge Zwei- oder Dreiräder sind, könnte die Regierung die Elektrifizierung vorantreiben, indem sie Elektroroller und -rikschas fördert. Zudem würde ein gutes öffentliches Verkehrswesen das Verlangen nach privatem Auto-besitz bremsen.

Ein besser organisierter städtischer Verkehr könnte buchstäblich Millionen Leben retten. Delhi und andere

Großstädte ersticken im Smog und leiden unter der vor allem von Dieselfahrzeugen erzeugten Feinstaubbelastung; dadurch sinkt die Produktivität der Wirtschaft um jährlich 18 Millionen Dollar, und jedes Jahr sterben mehr als eine Million Menschen vorzeitig.

Licht und Schatten der indischen Solarprogramme

Bei meinen Unterhaltungen mit Firmenvertretern fiel mir ein starker Kontrast zwischen Indern und Ausländern auf. International tätige Firmen sehen in Indien einen lukrativen Markt, der im Rekordtempo größer wird – doch indische Unternehmer äußern unter vier Augen nur Hohn und Spott. Sie wissen um Indiens maroden Energiesektor, die fehlende Förderung für Infrastrukturprojekte, lähmende politische Streitereien und Korruption. Diese Hindernisse blockieren die reibungslose Einführung sauberer Energie vor allem aus vier Gründen.

Erstens ist das verrottete Stromnetz überhaupt nicht darauf vorbereitet, auch nur einen kleinen Zuwachs an erneuerbaren Quellen zu bewältigen, und die Überlastung wird immer schlimmer. Da mit dem Klimawandel Dürren häufiger werden, setzen die Bauern verstärkt Bewässerungspumpen ein, die tiefere Grundwasserschichten anzapfen und dabei mehr Strom verbrauchen. 2012 verursachte das massiv zunehmende Einsetzen von Pumpen

den größten Stromausfall der indischen Geschichte. Immerhin fördert die Regierung den Gebrauch von Solarmodulen, um damit zunächst 200 000 Bewässerungspumpen anzutreiben. Am Ende sollen alle 26 Millionen Pumpen, die derzeit mit Diesel oder Strom aus der Steckdose laufen, Solarenergie nutzen. Aber die bereits bankrotten Versorgungsunternehmen können nichts in ein besseres Netz investieren, denn sie stecken in einem Teufelskreis: Sie geben ihren Strom – meist auf Druck einflussreicher Lokalpolitiker hin – zu billig ab, verschulden sich noch mehr und können das Netz daher weder aufrechterhalten noch vor ungezügelterm Stromdiebstahl schützen.

Zweitens wird der Aufbau der Infrastruktur durch fehlende private Finanzierung und durch umständliche Vorschriften behindert. Dabei erfordert allein der Ausbau erneuerbarer Energien bis 2020 Investitionen von 150 Milliarden Dollar – weit mehr, als die Regierung aufbringen kann. Auch hier entsteht ein Teufelskreis: Die Banken haben vor allem im Energiesektor bereits große Kredite für gescheiterte Projekte vergeben und sind deshalb zu weiteren Investitionen kaum in der Lage. Oft verlangen sie exorbitante Zinsen. Zudem scheitern viele Projekte an unklaren Regierungszusagen oder verzögern sich durch Schwierigkeiten beim Landkauf.

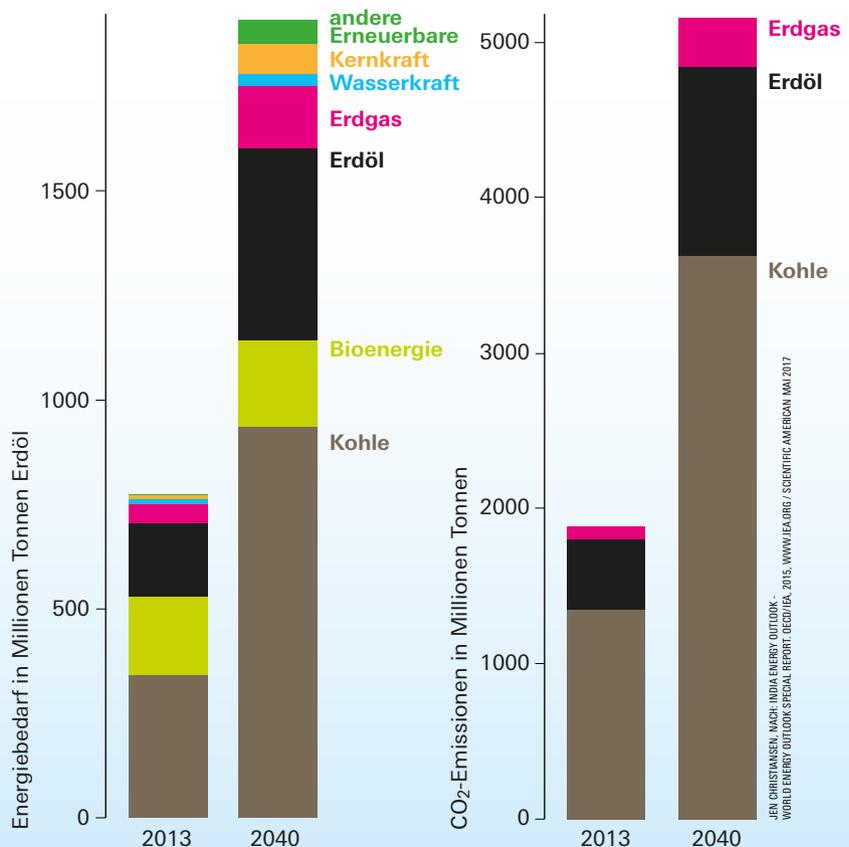
Drittens behindert die Politik vernünftige Maßnahmen. Zwar hat die Modi-Regierung ehrgeizige Ziele für Wind-

Mehr Energie, mehr Emissionen

Wenn Indiens Bevölkerung und seine Wirtschaft wie prognostiziert wachsen, würde sich die Energienachfrage bis 2040 gegenüber 2013 mehr als verdoppeln. Falls die Energiepolitik des Landes lediglich den 2015 bei der Pariser Klimakonferenz eingegangenen Verpflichtungen folgt, wird sich der Energiemix nur langsam ändern, und die CO₂-Emissionen könnten ebenfalls auf das Zweifache steigen. Für eine umweltfreundlichere Entwicklung muss Indien künftig stärker auf Erdgas, Solarenergie und Windkraft setzen sowie Elektroautos und das Energiesparen fördern.

Mit steigendem Energiebedarf ...

... wachsen auch die CO₂-Emissionen





Lokale Netze – so genannte Microgrids – können Regionen mit Strom versorgen, die Überlandleitungen nicht erreichen. Solarmodule (links) liefern per Microgrid Strom für ein Dorf. In einem anderen lokalen Netz speichern Batterien die Solarenergie für trübe Tage (rechts).

und Solarenergie gesetzt, doch die Durchführung liegt zumeist bei den Bundesstaaten, die gern auf Zeit spielen. Eine weitere Regierungsinitiative zur Streichung der Treibstoffsubventionen erhöhte zwar die Preise für Benzin und Diesel, scheiterte aber beim Verteuern von Kerosin und Heizgas an politischen Widerständen. Solange Erdgas unter dem Marktwert verkauft wird, verspüren die Firmen kaum Anreize, neue Gasquellen zu erschließen, um die heimische Produktion zu steigern.

Und viertens hat die von Modi eingeführte Besteuerung der Kohleförderung nicht nur die Bergbauunternehmen erbittert, sondern auch deren Kunden – insbesondere die Stahlfirmer – sowie die Regierungen der Kohle produzierenden Bundesstaaten. Das sind mächtige politische Kräfte, an denen jede weitere Erhöhung der Steuer scheitern dürfte. Sie ist ohnehin viel niedriger als die Kosten der Umweltbelastung, die das Verbrennen von Kohle verursacht.

In dieser verfahrenen Lage geht es für die Politik zunächst einmal darum, die Versorgungsunternehmen von ihrer drückenden Schuldenlast zu befreien, denn nur dann können sie das Netz überarbeiten und erneuerbare Energie bezahlen. Die Regierung hat immerhin versprochen, einen Teil der Schulden zu übernehmen, wenn die Unternehmen im Gegenzug die massiven Verluste im Netz verringern, die oft mehr als ein Viertel der eingespeisten Energie auffressen. Überdies müsste Modi den Einfluss der Bundesstaaten auf die Energieversorger eindämmen, damit die Firmen nicht mehr gezwungen sind, lokalen Politikern zuliebe den Strom zu billig zu verkaufen.

Ebenso wichtig wären schärfere Vorschriften zur Energieeinsparung für die Industrie sowie das schnellere Bewilligen von Gaskraftwerken, Pipelines und Anlagen zum Flüssiggasimport. Gefragt sind auch stärkere Anreize zur Abscheidung und Speicherung von CO₂-Emissionen, wie dies eine Chemiefabrik in Südindien inzwischen praktiziert. Noch besser wäre es, schon früher als 2022 keine neuen Kohlekraftwerke mehr zuzulassen. All das wird ein Zusammenspiel von Zentralregierung und Einzelstaaten erfordern sowie Durchsetzungsvermögen gegen Industrie-lobbys.

Politisches Einvernehmen lässt sich am besten herstellen, wenn die erneuerbaren Energien finanzielle Vorteile bringen. Das haben Initiativen wie Energy Efficiency Services Limited durch die Förderung lokaler Kleinbetriebe erreicht.

Ein Anliegen der ganzen Welt

Eines ist allerdings klar: Indien wird den Übergang zu niedrigen CO₂-Emissionen nicht allein schaffen. Es braucht Hilfe bei der Entwicklung und Finanzierung neuer Technologien. Derzeit unterhält Indien bereits Partnerschaften mit den USA für die Erforschung und Entwicklung sauberer Energien, mit Deutschland zur Finanzierung eines stabilen Stromnetzes und mit multilateralen Entwicklungsbanken für die umweltfreundliche Modernisierung des Energiesektors.

Doch der Umfang der Hilfe muss mindestens auf das Zehnfache steigen. Andernfalls wird Indien weiterhin ineffiziente Kohlekraftwerke installieren, ausländisches Öl verschwenden und sich mit einem unzuverlässigen Stromnetz abmühen. Statt bloß zuzuschauen, ob und wie Indien allein in eine CO₂-arme Zukunft schreitet, sollten die Industrieländer ihm dabei helfen. Dafür gibt es einen starken finanziellen Anreiz: Länder, die Indiens Energiewandel beschleunigen, eröffnen der eigenen sauberen Energietechnik einen lukrativen Exportmarkt. Und darüber hinaus hängt davon die Zukunft unseres Planeten ab. ◀

QUELLEN

Berry, S. et al.: Energizing India: Towards a Resilient and Equitable Energy System. SAGE Publications, 2017

Ebinger, C.K.: India's Energy and Climate Policy: Can India Meet the Challenge of Industrialization and Climate Change? Brookings Institution, 2016

Sivaram, V. et al.: Reach for the Sun: How India's Audacious Solar Ambition Could Make or Break its Climate Commitments. Steyer-Taylor Center for Energy Policy and Finance, Stanford University, 2015

International Energy Agency (Hg.): India Energy Outlook. World Energy Outlook Special Report. Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris 2015

Zum Aufrufen?

*Streitkultur)
im Spiegel der
Wissenschaft*

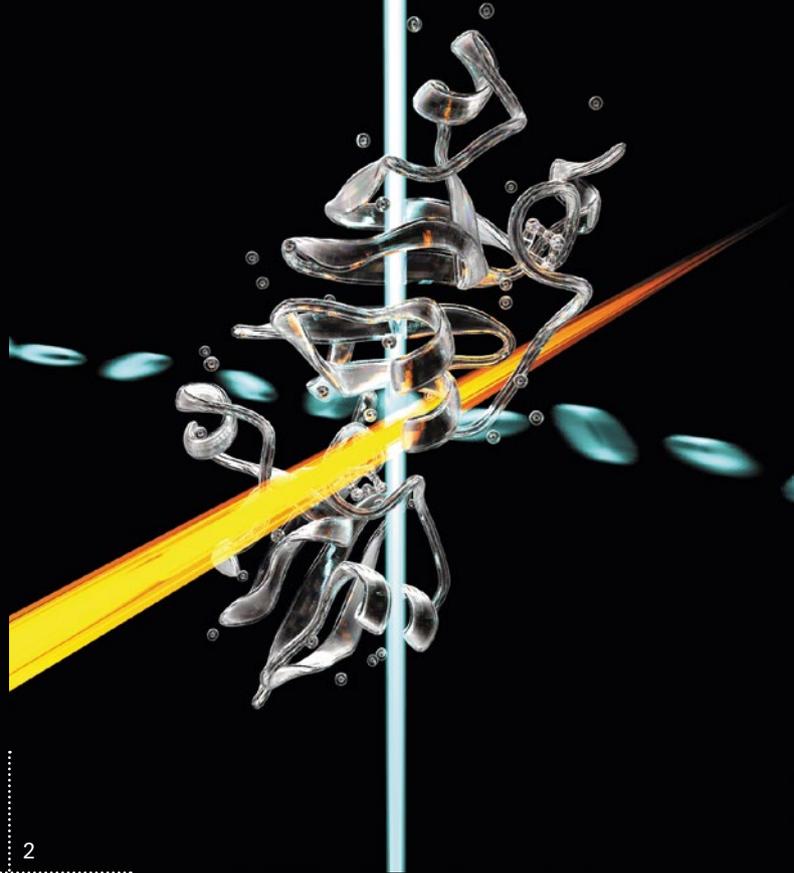
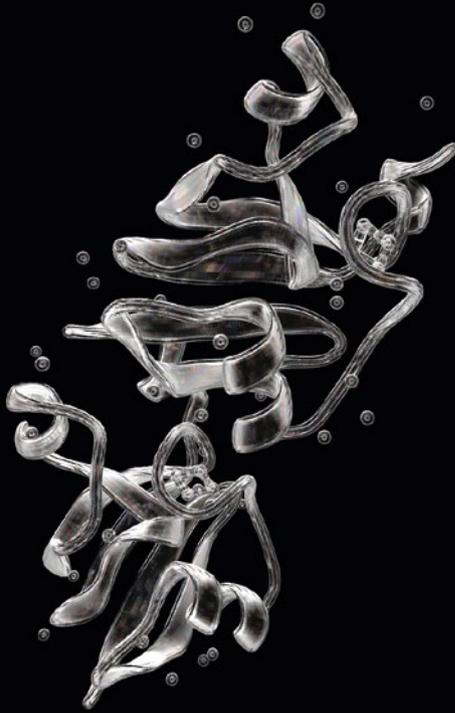
-> www.hochschulverband.de/symposien

DHV-SYMPOSIUM 2017

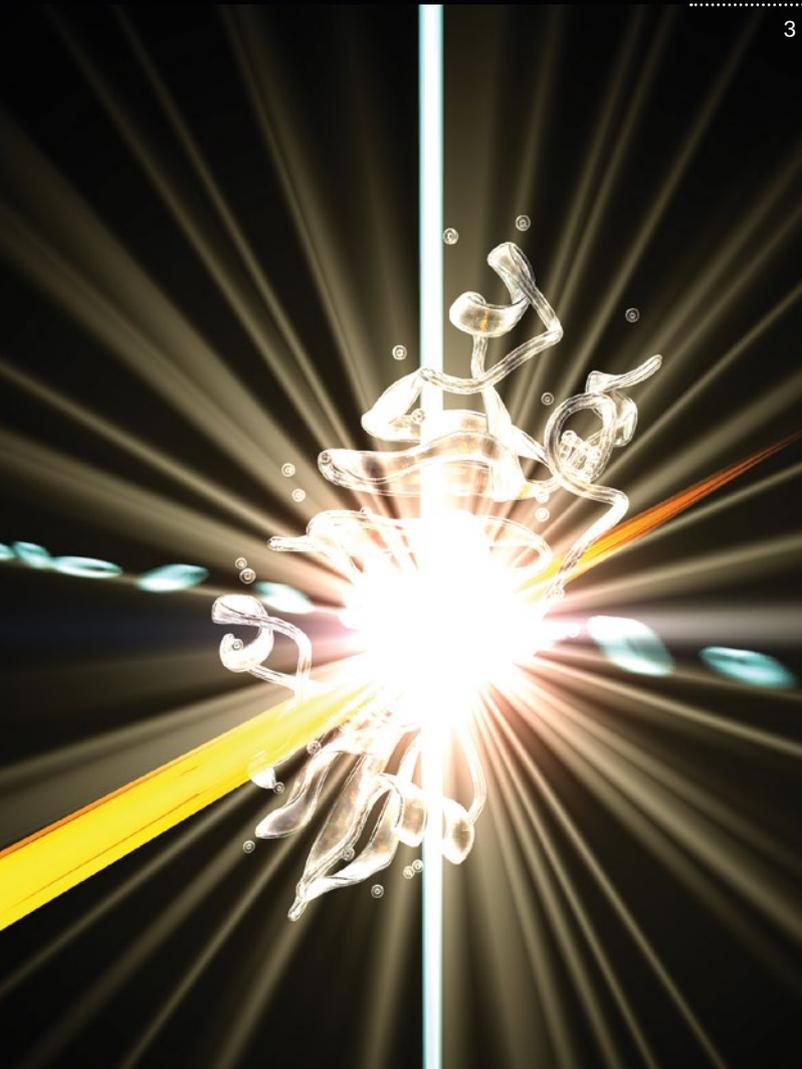
18. OKTOBER

BONN

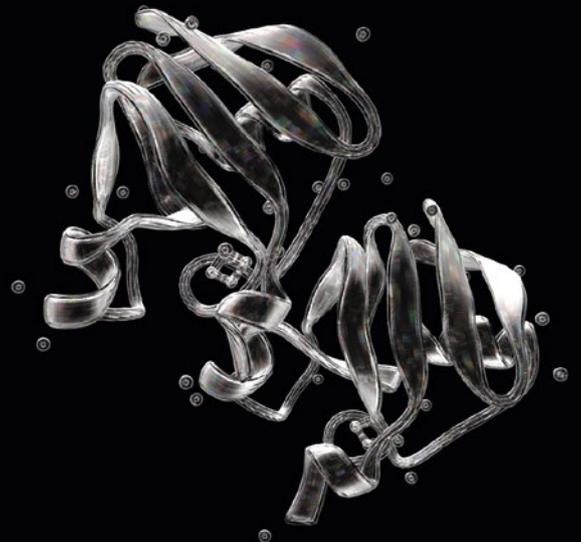




1 2
3 4



Ein Biomolekül (1) aus einem Strahl von Nanokristallen wird durch Laserlicht (von unten) angeregt (2). Kurz Zeit später trifft ein Röntgenblitz (gelb) darauf (3) und liefert Informationen über die Struktur, noch bevor die Atome sich umlagern (4).



STRUKTURBIOLOGIE MOLEKULARE SCHNAPPSCHÜSSE

Mit Röntgenlasern erhalten Physiker einmalige Einblicke in den Ablauf biochemischer Reaktionen. So beobachten sie beispielsweise, wie Proteine ihre Form in milliardstel Sekunden an wechselnde Umgebungsbedingungen anpassen.



Die Biochemikerin **Petra Fromme** ist Professorin an der US-amerikanischen Arizona State University (ASU) und Direktorin des dortigen Biodesign Center for Applied Structural Discovery. **John C. H. Spence** ist Physikprofessor an der ASU und Experte für Experimente mit Röntgenlasern.

► spektrum.de/artikel/1496905

► Im Dezember 2009 haben Wissenschaftler in einem unterirdischen Labor nahe Palo Alto in Kalifornien letzte Vorbereitungen für eine Reihe ganz besonderer Explosionen getroffen. Durch Sprengungen winziger Proteinkristalle wollten sie eines der am besten gehüteten Geheimnisse der Pflanzenwelt lüften: wie bei der Fotosynthese aus Sonnenlicht chemische Energie entsteht.

Die Geschichte spielte am kalifornischen SLAC National Accelerator Laboratory am Röntgenlaser Linac Coherent Light Source (LCLS). Dort werden Elektronen in einem drei Kilometer langen Beschleunigtunnel auf nahezu Lichtgeschwindigkeit gebracht und mit Magnetfeldern abgelenkt. Das erzeugt intensive Röntgenblitze. Forscherteams hatten tagelang an der Versuchsanordnung gearbeitet. Eine Gruppe justierte Injektoren, die winzige Proteinkristalle in einen solchen Röntgenstrahl schießen würden. Eine andere belud die Injektoren mit frischen Kristallen eines Proteinkomplexes namens Photosystem I, der eine Schlüsselfunktion in der Fotosynthese einnimmt. Schließlich trafen die Kristalle in das energiereiche Röntgenlicht. Die Strahlung zerfetzte die Proteine – doch zuvor gelangen den Wissenschaftlern Schnappschüsse der atomaren Struktur.

Inzwischen untersuchen Biophysiker mit der Methode zelluläre Vorgänge in kleinstem Maßstab und von Grund

auf neu. Dazu setzen sie rasche Folgen solcher Bilder zu Filmen zusammen. Jedes von ihnen wurde dabei in wenigen Femtosekunden, also milliardstel (10^{-15}) Sekunden aufgenommen.

Der berühmte Physiker Richard Feynman sagte, alle Vorgänge des Lebens könnten durch Rütteln und Wackeln von Atomen verstanden werden. Nun endlich betrachten wir den Tanz von Atomen und Molekülen tatsächlich in der nötigen räumlichen und zeitlichen Auflösung. Mit dieser so genannten seriellen Femtosekunden-Kristallografie (SFX) haben internationale Forscherteams bereits detailliert aufgedeckt, wie ein Arzneimittel den Blutdruck reguliert, und so den Weg für die Entwicklung besserer Wirkstoffe geebnet. Auch offenbarte die Technik die Struktur eines Enzyms, das bei der von Parasiten verursachten tödlichen afrikanischen Schlafkrankheit die roten Blutzellen zerstört, und hat erste Einblicke in die Anfangsschritte der Fotosynthese geliefert.

Aber zurück ins Untergrundlabor im Jahr 2009. Es stand viel auf dem Spiel, als die ersten Pulse des Röntgenlasers unsere mühsam herangezüchteten Proteinkristalle zerschlugen. Damals waren viele Wissenschaftler der Überzeugung, SFX könne niemals funktionieren; wir hatten einige Mühe damit gehabt, Forschungsmittel zu beschaf-

fen. Als dann die ersten Bilder der gebeugten Röntgenstrahlen auf den Computermonitoren auftauchten, brach im gesamten Raum Jubel aus. Wir hatten ein neues Kapitel in der Forschung aufgeschlagen.

Vor der Entwicklung der Methode waren Wissenschaftlern bereits bedeutende Fortschritte beim Nachweis bestimmter chemischer Umordnungen gelungen. Die besonders filigranen und komplizierten biologischen Strukturen hingegen konnten sie nicht in Aktion verfolgen. Beispielsweise erfand der spätere Nobelpreisträger und inzwischen verstorbene ägyptische Chemiker Ahmed Zewail in den 1980er Jahren eine Möglichkeit, Atome während chemischer Reaktionen mit ultrakurzen Laserblitzen zu beobachten. Aber noch war die Wellenlänge des verwendeten Lichts zu groß, um Einzelheiten innerhalb von Proteinstrukturen zu erkennen.

In jüngerer Zeit haben dramatische Fortschritte bei verschiedenen Mikroskopietechniken Aufnahmen von Proteinen und Viren in nahezu atomarer Auflösung ermöglicht. Die Belichtungszeiten sind jedoch nicht kurz genug, um solch rasche Reaktionen festzuhalten, wie sie etwa während der Fotosynthese ablaufen.

Wir entschieden uns für Röntgenlicht, da es die prinzipiell erforderlichen kurzen Wellenlängen und Impulsdauern hat, um biologische Prozesse zu verfolgen. Am wichtigsten für unsere Arbeit war die Entwicklung einer Technologie, bei der die Röntgenstrahlen Informationen über die Struktur auslesen – und zwar noch bevor sie die Moleküle zerstören.

Üblicherweise züchten Wissenschaftler, die sich mit Strukturanalysen beschäftigen, in einem langwierigen Prozess Kristalle von Proteinen und anderen Molekülen. Sie lassen dann Röntgenstrahlen auf die so präparierte Probe prallen und zeichnen auf einem Detektor dahinter das Beugungsmuster auf. Die im Gitter regelmäßig angeordneten Moleküle lenken die Photonen in charakteristischer Weise ab, und umso mehr identische Strukturen das auf gleiche Weise tun, desto deutlicher erscheint das

gemessene Streusignal. Darum sind möglichst große, einheitliche Kristalle nötig. Anschließend ermitteln die Forscher mit der Hilfe von Computerprogrammen die Art und Position der Atome. Diese Methode wird als Röntgenkristallografie beziehungsweise Röntgenstrukturanalyse bezeichnet. Unsere serielle Femtosekunden-Kristallografie nutzt das gleiche Grundprinzip, funktioniert aber erheblich schneller und mit kleineren Kristallen.

Dafür brauchen wir extrem intensive Röntgenstrahlen. Das Licht unseres Röntgenlasers kann sogar Stahlblech durchlöchern. Darum zerstört es zwangsläufig die Moleküle, deren Struktur wir aufklären möchten. Der kritische Moment der SFX-Technik liegt in dem winzigen Zeitfenster zwischen dem Auftreffen des Laserpulses auf dem Molekül und dem Augenblick, wo die Energie des Strahls die ersten Elektronen aus den Atomen herausschlägt. Von da an stoßen sich nämlich die von ihren Elektronen befreiten positiv geladenen Atomrümpfe gegenseitig ab und lassen die Moleküle regelrecht explodieren. Die Herausforderung besteht also darin, der schädigenden Wirkung der Laserstrahlen zuvorzukommen und ein Bild aufzunehmen, bevor sich die Anordnung der Atome merklich verändert hat – innerhalb von Femtosekunden. Zur Veranschaulichung des Zeitfensters: Das Verhältnis von einer Femtosekunde zu einer Sekunde entspricht dem von einer Sekunde zu 32 Millionen Jahren!

Erst beugen, dann zerstören – würde das bei empfindlichen Biomolekülen funktionieren?

Zunächst züchten die Forscher kleinste Kristalle aus den Proteinen. Darauf schießen sie dann beim Experiment energiereiche Röntgenpulse. Schließlich erfasst ein Detektor das jeweilige Beugungsmuster, dessen Form von der Art und Position der Atome in dem Molekül abhängt. Anhand der aufgenommenen Bilder einer ganzen Serie von Proteinkristallen, die in unterschiedlichen Winkeln von den Röntgenstrahlen getroffen werden, lassen sich dann 3-D-Strukturen rekonstruieren. Aus Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten während eines Reaktionsablaufs entstehen sogar Sequenzen wie in einem Film.

Erste Schritte in diese Richtung ermöglichten im Jahr 2000 die Biophysiker Janos Hajdu und Richard Neutze von der Universität Uppsala in Schweden. Wie sie berechneten, würde es rund zehn Femtosekunden dauern, bis ein von Röntgenstrahlen getroffenes Molekül zu explodieren beginnt. Es wären also auch entsprechend schnelle Schnappschüsse notwendig. 2006 gelang das einem Team um Henry Chapman, der inzwischen am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg arbeitet. Mit dem Ansatz »erst beugen, dann zerstören« (»diffraction before destruction«) bildeten die Forscher mit nur einem intensiven Lichtblitz zwei winzige Strichmännchen und eine ebenso winzige Sonne ab, die in eine Membran aus Siliziumnitrid eingeritzt waren.

Aber würde dies auch bei empfindlichen Biomolekülen funktionieren? Die meisten Forscher waren skeptisch, als wir unsere Absicht kundtaten, es auszuprobieren. Unsere ersten zehn Anträge auf Forschungsmittel wurden abgelehnt. Es gab Zweifel: Die Pulse der Röntgenlaser seien

AUF EINEN BLICK CHEMIE IN EXTREMER ZEITLUPE

- 1** Elektronen und Atome in Proteinen und anderen komplexen Molekülen bewegen sich viel zu schnell, als dass sich einzelne Reaktionsschritte mit herkömmlichen Methoden genauer verfolgen lassen.
- 2** Intensive Lichtblitze von modernen Röntgenlasern hingegen zerstören zwar die Proben, gewinnen dabei aber wertvolle Informationen über die räumliche Struktur während eines ultrakurzen Augenblicks.
- 3** Aufwändig am Computer rekonstruierte Bilder zeigen detailliert, warum etwa Arzneimittel manchmal nicht optimal auf ihren Zielrezeptor passen oder wie die pflanzliche Fotosynthese Energie erzeugt.

nicht kurz genug, die Kristalle wären zu klein für irgendein auswertbares Signal, oder wir fänden niemals die Orientierung des Kristalls zum Zeitpunkt des Auftreffens heraus, die jedoch eine unverzichtbare Information zur Ermittlung der dreidimensionalen Struktur des Proteins ist.

Wir waren allerdings davon überzeugt, dass es bei Biomolekülen gelingen könnte. Eine von uns (Fromme) versuchte sich mit ihrem Team ausgerechnet an einer der

kompliziertesten Strukturen, dem Photosystem I mit dutzenden Proteinen und Hunderten von Licht einfangenden grünen und orangen Pigmenten.

Petra Fromme kannte das Photosystem I in- und auswendig; sie hatte Jahre mit dem Versuch zugebracht, es zu kristallisieren und seinen Aufbau mit anderen Methoden aufzuklären. Ferner dachten wir, die Größe des biomolekularen Komplexes könnte vorteilhaft sein, da wir

Filmen im Atommaßstab

Eine neue Mikroskopietechnik ermöglicht Einblicke in den Reaktionsablauf der Fotosynthese. Forscher versetzten einen Proteinkomplex in einen angeregten Zustand und gewannen mit einem energiereichen Röntgenlaser Momentaufnahmen der Veränderungen – in Bruchteilen einer Sekunde und noch bevor die Energie des Strahls die Proteine zerstörte.

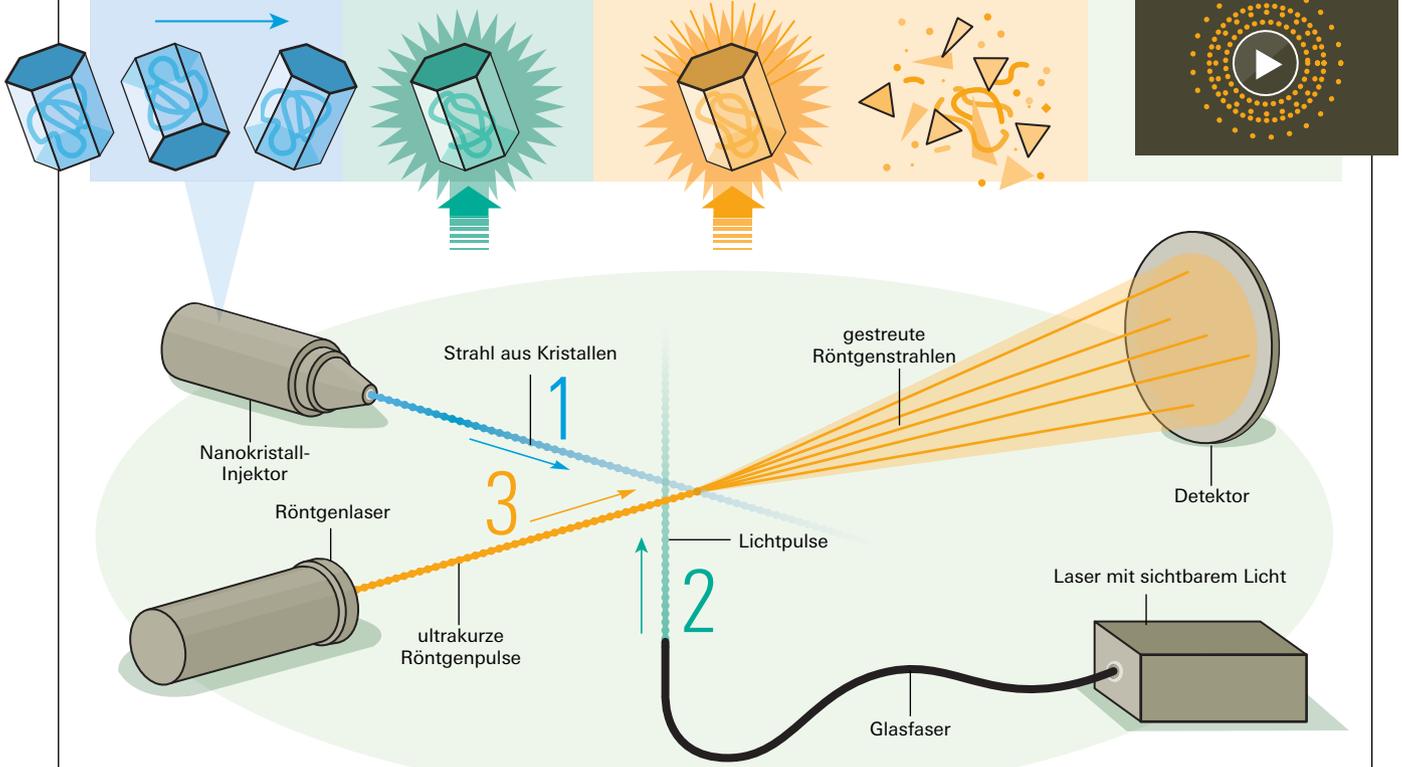
1 Aus einem Proteinkomplex entstehen im Labor winzige Kristalle. Pro Sekunde strömen hunderttausende aus der Düse eines speziellen Injektors.

2 Laserpulse simulieren die Sonnenstrahlung, wodurch sich die Atome in den lichtempfindlichen Molekülen umlagern. Dieser Reaktionsschritt erfolgt in Femtosekunden, also in milliardstel Sekunden.

3 Kurz darauf treffen Röntgenstrahlen auf den Kristall. Ein Detektor zeichnet das entstehende Beugungsmuster auf. Variierende Zeitabstände zwischen dem Licht- und dem Röntgenblitz ergeben Aufnahmen während der gesamten Reaktion.

4 Ein Röntgenpuls dauert nur einige zehn Femtosekunden, ist aber so energiereich, dass er den Proteinkristall im weiteren Verlauf der Wechselwirkung zerstört.

5 Mit einem Computerprogramm errechnen die Forscher aus den Beugungsmustern der gestreuten Strahlung Bilder der Proteinstruktur. Aus zehntausenden zweidimensionalen Momentaufnahmen entstehen so dreidimensionale Filme.



dadurch selbst mit einer geringen Anzahl an Beugungsmustern ein niedrig aufgelöstes Bild gewinnen könnten, das als Photosystem I erkennbar wäre. Und genau dies gelang uns in jenem unterirdischen Labor im Jahr 2009.

Zunächst benötigten wir für unseren Schnappschuss Kristalle des Photosystems. Normalerweise werden hierfür möglichst große solcher Festkörper gezüchtet, da erst viele identische Objekte gemeinsam eine hinreichend starke Streuung erzeugen. Bei einigen Stoffsystemen kann es Jahre experimenteller Forschung kosten, große, präzise geordnete Strukturen zu gewinnen. Bei manchen hat es sich als schier unmöglich erwiesen; Photosystem I ist eines davon.

Allerdings reichen für die SFX bereits Kristalle mit Durchmesser von weniger als einem Mikrometer, und die lassen sich deutlich leichter im Labor herstellen. Die Verwendung solcher Nanokristalle hingegen war eine ganz neue Herausforderung. Wir mussten nicht nur ein sehr starkes Streusignal von einer derart kleinen Probe erhalten, sondern auch einige grundlegende physikalische Herausforderungen bewältigen: Wie positioniert man Nanokristalle, die unter herkömmlichen Mikroskopen nicht mehr zu sehen sind, im Strahl eines Röntgenlasers – und das obendrein regelrecht am Fließband, um möglichst viele der Lichtblitze pro Sekunde einzufangen?

Zuerst mussten wir uns neue Methoden ausdenken, um die Nanokristalle zu erkennen. Eine davon nennt sich SONICC (second-order nonlinear imaging of chiral crystals, nichtlineare Bildgebung zweiter Ordnung von chiralen

Um die 3-D-Struktur zu ermitteln, müssen wir Zehntausende von Einzelaufnahmen aufwändig miteinander verrechnen

Kristallen). Hierbei wandeln die Kristalle zwei ultrakurze Pulse infraroten Lichts in ein grünes Photon um. So leuchten die Proben wie Glühwürmchen bei Nacht.

Eine weitere Technik löst das zweite Problem und bringt Kristalle in gleich bleibendem Tempo in den Röntgenlaser. Einer von uns (Spence) dachte sich gemeinsam mit den Physikern Uwe Weierstall und Bruce Doak von der Arizona State University ein Gerät aus, das analog zu einem Laserdrucker funktioniert und einen Flüssigkeitsstrom mit Nanokristallen quer durch den Röntgenstrahl schießt. Dieser Injektor führt die Nanokristalle so exakt ein, dass sie wie im Gänsemarsch kontinuierlich entlang einer Linie in den Strahl gelangen.

Damit der Injektor nicht verstopft, muss die Öffnung der Düse ausreichend weit sein, ohne jedoch den dünnen Strom allzu sehr zu verbreitern. Weierstall erreichte dies, indem er am Auslass rund um die Flüssigkeit zusätzlich Heliumgas strömen ließ. Das drückte die Bahn der Kristalle auf einen Durchmesser zusammen, der um den Faktor zehn kleiner war als die eigentliche Düsenöffnung.

Als wir die Geräte so weit im Griff hatten, sahen wir uns mit dem zusätzlichen Problem konfrontiert, die enormen Informationsmengen der Messreihen zu bewältigen. Ein einzelnes Experiment kann bis zu 100 Terabyte an Daten liefern und damit dutzende Festplatten eines modernen Rechners füllen. Um die 3-D-Struktur zu ermitteln, müssen wir Zehntausenden von Schnappschüssen obendrein die korrekte Orientierung jedes einzelnen Kristalls zuordnen und die Einzelaufnahmen der Fotochips (siehe Abbildung rechts) systematisch und aufwändig miteinander verrechnen. Zu diesem Zweck entwickelten wir gemeinsam mit Richard Kirian und Thomas White, beide seinerzeit in der Arbeitsgruppe von Chapman, eine spezielle Software. Damit konnten wir aus der Flut von Rohbildern 3-D-Rekonstruktionen der Probe erstellen.

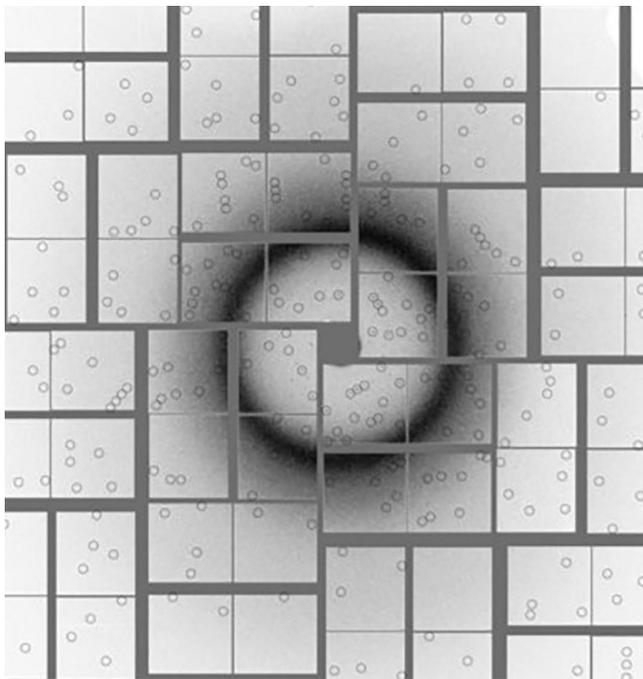
Die Schnappschüsse zeigen, wie Pflanzen Wasser in Wasser- und Sauerstoff spalten

Schritt für Schritt verbesserten wir unsere Technik. Im Jahr 2014 lieferte unsere Arbeit die erste Echtzeitaufnahme des Transfers von Elektronen zwischen zwei Hauptakteuren der Fotosynthese, dem großen, Sonnenlicht einfangenden Photosystem I sowie einem Protein namens Ferredoxin. Wenn Licht auf das Photosystem I trifft, wird es in Elektronen übersetzt, die Ferredoxin weitertransportiert. Sobald Ferredoxin die Elektronen übernommen hat, lösen sich die Proteinkristalle auf. Nur das superschnelle SFX-Verfahren gestattet Einblicke in die raschen Strukturänderungen, die bis dahin passieren.

Die nächste Herausforderung in dieser Forschungsrichtung ist ein Schwerpunkt von Petra Frommes Arbeit als Biochemikerin: Wie verwandelt eine Pflanze allein mit Hilfe von Sonnenlicht und den im Boden vorhandenen Metallen Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff? Diese biologische Spaltung ist für Wissenschaftler von größtem Interesse, denn von ihr inspirierte technologische Prozesse könnten sauber verbrennenden Wasserstoff als Treibstoff und Energiespeicher liefern.

Wir haben die ersten Schnappschüsse des Prozesses an dem hieran beteiligten Proteinkomplex 2014 zusammengetragen: dem Photosystem II. Trotz der noch geringen Auflösung lieferten sie Hinweise auf die Art der zugehörigen strukturellen Veränderungen. Einige Monate später hat eine Arbeitsgruppe um Jian-Ren Shen von der japanischen Universität Okayama die SFX-Technik für eine noch detailliertere Momentaufnahme eingesetzt. Als Nächstes wollen wir hoch aufgelöste molekulare Filme erstellen, in denen alle Phasen detailgetreu auf atomarer Ebene zu sehen sind.

Solche Videos von chemischen Reaktionen könnten nicht nur die Grundlagenforschung enorm bereichern, sondern sich auch recht schnell praktisch niederschlagen und etwa zu neuen und besseren Arzneimitteln führen. Wir erkannten dieses Potenzial, als wir an Angiotensin-II-Rezeptorblockern (ARB) forschten. Diese Arzneimittel sollen verhindern, dass das Hormon Angiotensin II an seinen zellulären Rezeptor andockt und dadurch die Gefäße verengt. ARB werden zur Behandlung von Bluthochdruck verordnet, einer der Hauptursachen von



Um große Bereiche des Beugungsmusters um den zentralen Röntgenstrahl zu erfassen, besteht der Detektor aus vielen quadratischen Sensoren. Die kleinen Kreise in den Einzelbildern kennzeichnen gestreute Lichtteilchen und lassen sich in Informationen über die Struktur des Proteins umrechnen. Der dunkle Ring entsteht durch Lösungsmittel im Kristall.

Schlaganfällen und Herzversagen. Die erste Generation dieser Arzneimittel hat sich zwar als wirksam erwiesen, aber da sie sich nur schwach an den Rezeptor haften, müssen hohe Dosen verabreicht werden. Die Folge sind entsprechend starke Nebenwirkungen.

Mit unserer Forschung konnten wir den Grund der schwachen Bindung aufklären: Die Arzneimittel passen nicht so gut zum Rezeptor, wie sie sollten. Das führte zur Entwicklung neuer, potenziell wirksamerer ARB, von denen sich ein Medikament inzwischen in der klinischen Erprobung befindet.

Bahnbrechende Bilder für die Pharmazie und die Grundlagenforschung

Die stark verbesserten räumlichen und zeitlichen Auflösungen könnten helfen, viele weitere Arzneimittel zu optimieren. Die Angiotensin-II-Rezeptoren gehören zu einer großen und sehr wichtigen Gruppe von Antennenmolekülen, den G-Protein-gekoppelten Rezeptoren in der Zellmembran. Diese ermöglichen es einer Zelle, ihre Umgebung wahrzunehmen und darauf zu reagieren. Die Wissenschaftler, die als Erste den Aufbau und die Wirkungsweise dieser Rezeptorklasse beschrieben haben, erhielten für ihre bahnbrechende Arbeit 2012 den Nobelpreis für Chemie. Die tragende Rolle der Rezeptoren beim Überleben und Wachstum einer Zelle macht sie zu hervorragenden Angriffszielen für neue Arzneimittel. Veränderungen ihrer Strukturen sehen zu können,

wird pharmazeutischen Chemikern beim Entwickeln von Arzneimitteln helfen, die sich optimal an die Rezeptoren im aktiven Zustand binden und weniger Nebenwirkungen haben.

Vadim Cherezov von der University of Southern California erläutert die Bedeutung des von ihm durchgeführten Angiotensin-II-Experiments: »Wir haben gezeigt, dass in all unseren früheren Molekülmodellen selbst die besten Abschätzungen zur Passgenauigkeit von Rezeptor und Arzneimittel in vielen wichtigen Punkten nicht korrekt waren.« So hat SFX Unterschiede in den Strukturen G-Protein-gekoppelter Rezeptoren offenbart, je nachdem, ob sie bei Raumtemperatur oder der in der Kristallografie üblichen niedrigen Temperatur errechnet wurden. Arzneimittel wurden bislang gewissermaßen für gefrorene Rezeptoren entwickelt statt für den warmen menschlichen Körper.

Manchmal sind Arzneimittel auch zu unspezifisch, zum Beispiel bei der Behandlung der Schlafkrankheit. Unsere Filme haben gezeigt, dass die Medikamente nicht nur mit den Proteinen des verursachenden Parasiten in Wechselwirkung treten, sondern in vergleichbarer Weise auch mit menschlichen Zellen. Auf Grund unserer präziseren Aufnahmen haben Pharmazeuten jetzt einen neuen Ansatz für Arzneimittel, die selektiv das parasitäre Protein angreifen und nicht das menschliche.

Viele Wissenschaftler nutzen SFX inzwischen, um unterschiedlichste Fragen zu beantworten. Marius Schmidt von der University of Wisconsin-Milwaukee und seine Kollegen erklärten beispielsweise mit molekularen Filmen, wie unsere Augen etwas wahrnehmen. Bakterien können zwar nicht in unserem Sinne sehen, verfügen aber über lichtempfindliche Proteine, die evolutionär betrachtet Vorläufer der Rezeptormoleküle unseres eigenen visuellen Systems sind. Das Team erstellte ein Zeitlupenvideo der extrem schnellen Reaktion eines solchen kristallisierten bakteriellen Proteins auf Licht. In Abständen von einer billionstel Sekunde zeigen die Bilder genau die dynamische Phase nach der Absorption, noch bevor das Molekül weiter reagieren konnte. Dieser Zustand ist elementar für die Lichtwahrnehmung aller lebenden Organismen und der erste Schritt beim Sehprozess.

Wir sind überzeugt, dass die Zukunft der Kristallografie in dieser Methode der ultraschnellen Bildgebung liegt. Und wer weiß – vielleicht werden viele der bekannten Proteinstrukturen im kommenden Jahrzehnt nicht mehr statisch in Lehrbüchern abgebildet sein, sondern jeder wird sie und ihre Wechselwirkungen als dreidimensionalen Film abrufen können. ◀

QUELLEN

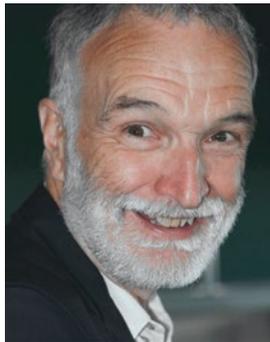
Chapman, H. N. et al.: Femtosecond X-Ray Protein Nanocrystallography. In: Nature 470, S. 73–77, 2011

Fromme, P.: XFELs Open a New Era in Structural Chemical Biology. In: Nature Chemical Biology 11, S. 895–899, 2015

Spence, J. C. H. et al.: X-Ray Lasers for Structural and Dynamic Biology. In: Reports on Progress in Physics 75, 102601, 2012

Waldrop, M. M.: X-Ray Science: The Big Guns. In: Nature 505, S. 604–606, 2014

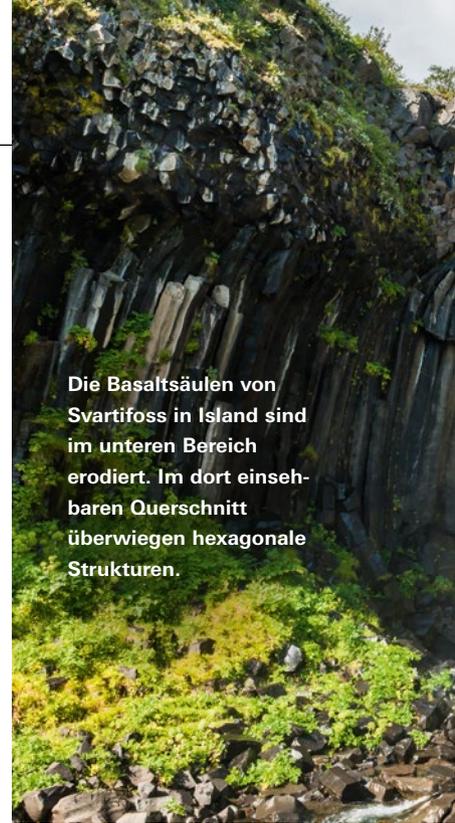
SCHLICHTING! SÄULEN DER ERDE



Wenn Lava erstarrt, erzeugen Spannungen im abkühlenden Basaltgestein ein Netzwerk von Rissen. Die Spalten formen tiefe Säulen mit einem faszinierend regelmäßigen, meist sechseckigen Querschnitt.

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/1496907



Die Basaltsäulen von Svartifoss in Island sind im unteren Bereich erodiert. Im dort einsehbaren Querschnitt überwiegen hexagonale Strukturen.

► Auf La Palma wird man im wahrsten Sinn des Wortes auf Schritt und Tritt mit dem vulkanischen Ursprung der Kanaren konfrontiert. Selbst manche Gehwege erwecken den Eindruck, man würde über erkaltete Lava wandeln – sie zeigen das charakteristische Muster der Basaltsäulen, die auf der Insel an vielen Orten anzutreffen sind (siehe Foto auf der rechten Seite). Die imposanten Gebilde sind eine typische Hinterlassenschaft des Vulkanismus und haben an einigen Plätzen der Erde Berühmtheit erlangt, beispielsweise der Giant's Causeway in Irland oder die Säulen von Svartifoss in Island (großes Bild oben).

Die Bruchstrukturen sehen im Querschnitt ein wenig wie Natursteinmauern aus, bei denen leicht unterschiedlich geformte Brocken wie in einem Puzzle passgenau aneinandergesetzt werden. Die polygonalen Muster der Basaltsäulen hingegen sind ganz von selbst entstanden. Vermutlich beruht ein großer Teil ihrer Faszination auf der seltsamen, scheinbar planmäßigen Ordnung und auf der Vorstellung, welche gewaltigen Prozesse sich dabei

wohl abgespielt haben mögen. Diesen kann man mit physikalischen Mitteln auf die Spur kommen.

Wenn flüssige Lava nach einem Vulkanausbruch erstarrt, schrumpft das Volumen des erkaltenden Basalts. Infolgedessen ziehen die Teilchen der zuerst abkühlenden obersten Gesteinsschicht immer stärker

aneinander in alle Richtungen. Die Unterseite ist fest mit dem noch heißen Boden verbunden. Das hindert sie daran, dem Zug nachzugeben, und so baut sich eine wachsende Spannung im

Dieses Ufer von fremdartiger Schönheit besteht aus einer langen Reihe hoher Basaltsäulen

Jules Verne (1828–1905)

Material auf. Wenn diese schließlich ein kritisches Maß überschreitet, bricht die Oberseite auf, vornehmlich an zufällig vorhandenen Schwachstellen.

Die Risse sorgen für eine erste Entspannung. Mit fortschreitender Abkühlung treten in den nunmehr getrennten Bereichen allerdings erneut Zugkräfte auf. Es kommt zu weiteren Brüchen und sekundären Rissen. Diese können die meiste Energie freisetzen, indem sie die Spannungen auflösen, die vom primären Riss noch nicht ausgeglichen wurden – das sind gerade die parallel zu Letzterem verlaufenden Zugkräfte. Das lenkt die Risse vornehmlich so, dass sie schließlich annähernd senkrecht auf den alten Riss auftreffen (siehe Bild links). Auf diese Weise zerfällt die Oberflächenschicht des Basalts schließlich in ein System voneinander isolierter Inseln mit vielen rechten Winkeln.

Der Vorgang erinnert an die Entstehung von Trockenrissen, auch wenn dort die Substanz nicht durch Abkühlung schrumpft, sondern durch Wasserverlust (»Das Schicksal einer Pfütze«, **Spektrum** Oktober 2015, S. 56). Wegen dieser Ähnlichkeit untersuchen Wissenschaftler sogar seit einigen Jahren eintrocknende Stärke-Wasser-



Die Spannung ist parallel zu einem bestehenden Riss (schwarz) maximal. Neue Spalten (rot) werden daher senkrecht auf den Riss zu gelenkt.

H. JOACHIM SCHLICHTING



GIGA_DAVILOWA / GETTY IMAGES / ISTOCK

mehr, je größer die neu entstehenden Mantelflächen ausfallen. Am ehesten formen sich deswegen Säulen mit einer möglichst kleinen Oberfläche. Unter idealisierten Bedingungen wäre das bei einer einzelnen kreisrunden Säule der Fall; da unter realen Umständen gleichzeitig die Grenzflächen des benachbarten Gesteins mit optimiert werden, läuft der Prozess auf eine hexagonale Form hinaus. Dieselbe Strategie zur effizienten Einteilung des Baumaterials beobachten wir bei den Wabenstrukturen in Bienenestern.

Wie sich der Wechsel von Vier- zu Sechsecken bei Basalt im Einzelnen abspielt, ist Gegenstand aktueller experimenteller und theoretischer Untersuchungen. Dabei ist wiederum das Stärke-Wasser-Modell hilfreich. An ihm konnten Forscher mit Hilfe von computertomografischen Aufnahmen zeigen, dass der Säulendurchmesser mit zunehmender Tiefe lokal abrupt anwachsen kann: Dann verschmelzen zwei oder drei Säulen miteinander. Das führt zu einer gröberen, aber auch regelmäßigeren Aufteilung (siehe Bild ganz unten). Derartige Übergänge beobachtet man auch an realem Basalt.

Mischungen, um Rückschlüsse auf die Strukturbildung von Basaltsäulen zu ziehen.

Weil der Basalt von oben immer weiter nach unten erkaltet, werden auch die Sprünge und Risse in die Tiefe getrieben, und ein System wachsender Säulen entsteht. Deren mittlerer Durchmesser hängt von den Temperaturunterschieden ab. Sie sind umso dicker, je langsamer das Netzwerk der Spalten voranschreitet.

Schaut man sich die Querschnittsform der so entstandenen Säulen in weiter unten gelegenen Schichten genauer an, so stellt man überrascht fest: Anders als zu Beginn treten hier kaum noch rechte Winkel auf. Stattdessen zeigen sich wesentlich regelmäßiger Konfigurationen mit vorwiegend hexagonalen Querschnitten – und zwar in Experimenten mit Stärke ebenso wie im Basalt (siehe Foto ganz rechts).

So ein Übergang zu regelmäßigen Sechsecken ist theoretisch allerdings zu erwarten. Denn in der Natur laufen selbsttätige Vorgänge stets so ab, dass dabei so viel Energie an die Umgebung abgegeben wird wie unter den gegebenen Umständen möglich (zweiter Hauptsatz der Thermodynamik). Für die Aufspaltung des Materials beim Säulenwachstum ist Energie nötig, und zwar umso

H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING

Ein Gehwegpflaster auf der Vulkaninsel La Palma (links) zeigt die typische Rissstruktur der dort überall anzutreffenden Basaltsäulen. Ein getrocknetes Stärke-Wasser-Gemisch (rechts) zerfällt in ähnlich geformte Bruchstücke.

Einige der Vorgänge kann man in einem einfachen Experiment nachvollziehen. Dazu lässt man in einem zylindrischen Gefäß ein Stärke-Wasser-Gemisch allmählich austrocknen, zum Beispiel unter einer Rotlichtlampe. Bei einer eher dünnen Schicht erkennt man Analogien zu Trockenrissen in einer Wasserpfütze, bei einer dickeren hingegen bekommt man auch typische Effekte der Säulenbildung zu sehen.

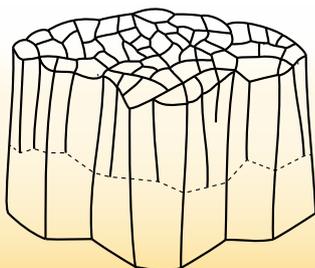
QUELLEN

Bahr, H.-A. et al.: Diameter of Basalt Columns Derived from Fracture Mechanics Bifurcation Analysis. In: Physical Review E 79, 056103, 2009

Hofmann, M. et al.: Why Hexagonal Basalt Columns? In: Physical Review Letters 115, 154301, 2015

Müller, G.: Trocknungsrisse in Stärke. In: Physikalische Blätter 10, S. 35–37, 1999

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH BAHR, H.-A. ET AL.: DIAMETER OF BASALT COLUMNS DERIVED FROM FRACTURE MECHANICS BIFURCATION ANALYSIS. IN: PHYS. REV. E 79, 056103, 2009, FIG. 1



Nach unten hin zusammenwachsende Säulen bilden mit der Zeit hexagonale Querschnitte aus.

ARCHÄOLOGIE VIETNAMS ALTSTEINZEIT

MIT FRODL. GEN. VON NGUYEN LAN CUONG



Das Foto von 2008 zeigt Ausgrabungen in der Con-Moong-Höhle. In den mehr als acht Meter mächtigen Kulturschichten fand man Steinwerkzeuge des Sonvian, Hoabinhian und Bacsonian sowie drei Bestattungen.

ALS BAMBUSZEIT?



SERIE VIETNAM Während Jäger und Sammler im eiszeitlichen Europa ausgefeilte Waffen und Werkzeuge erfanden, um zu überleben, begnügten sich die Bewohner Vietnams mit schlichten Steingeräten. Gab es keinen Grund für Innovationen?



Die promovierten Prähistoriker **Ingo Kraft** (links) und **Johann Friedrich Tolksdorf** forschen am Landesamt für Archäologie Sachsen. Kraft ist Experte für Wildbeuterkulturen. Ihn beschäftigten die Anpassungsmechanismen

der altsteinzeitlichen Jäger- und Sammlergruppen in Vietnam. Tolksdorf forscht über die von menschlichen Eingriffen bedingten Landschaftsveränderungen.

» spektrum.de/artikel/1496909

SPEKTRUM-SERIE Archäologie in Vietnam

Teil 1: Oktober 2017
Vietnams Altsteinzeit als Bambuszeit?
Ingo Kraft und Johann Friedrich Tolksdorf

Teil 2: November 2017
Die Hügel der Salzsieder
Andreas Reinecke

Teil 3: Dezember 2017
Bronzetrommeln
Andreas Reinecke

▶ Vor gut 14700 Jahren begann sich die Welt dramatisch zu verändern: Eine globale Erwärmung beendete die letzte große Kaltzeit (umgangssprachlich als Eiszeit bezeichnet). Vor allem in der Nordhemisphäre waren die Auswirkungen enorm: Die Gletscher schmolzen, Waldland verdrängte die eisigen Tundren, und der Meeresspiegel stieg im Lauf der nächsten Jahrtausende weltweit um bis zu 115 Meter. Seitdem trennt nicht nur die Nordsee Großbritannien vom Festland. In Südostasien verschwand sogar eine Landmasse von der Größe Westeuropas; dabei entstand unter anderem der Golf von Tonking vor Vietnams Küste. Für die Jäger und Sammler Europas brach eine neue Zeit an, die innovative Jagdstrategien erforderte. Anhand zahlreicher Fundstellen können Prähistoriker diesen Wandel für Westeuropa inzwischen im Detail nachvollziehen (siehe »Umbrüche am Ende der Eiszeit«, **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 1/2017, S. 6–13).

Im Fall Vietnams ist die Faktenlage deutlich schlechter. Etliche Lager- und Siedlungsplätze dürften im heutigen Schelfgebiet liegen, das heißt unter Wasser und Schlack verborgen sein. Obendrein herrschte schon vor Jahrtausenden ein subtropisches bis tropisches Klima in der Region, in dem organische Überreste schnell verrotteten, sofern sie nicht durch einen glücklichen Zufall in ein feuchtes, sauerstoffarmes Bodenmilieu gerieten.

Wir wissen nicht einmal genau, seit wann Menschen in der Region lebten. Es gibt nur Anhaltspunkte: Menschlichen Skelettresten zufolge erreichte der *Homo sapiens* vor spätestens 40000 Jahren Australien, und da er von Afrika kommend über das südliche Asien dorthin gezogen sein muss, dürfte er auch Vietnam passiert haben. Dieser These entsprechen die Überreste zweier Individuen in der Tam-Pa-Ling-Höhle im benachbarten Laos, deren Datierung allerdings umstritten ist.

Gerade im Norden Vietnams boten die Höhlen und Felsdächer der Kalkgebirge den kleinen Gruppen umherstreifender Wildbeuter Schutz gegen Raubtiere und

Witterung. In den 1920er Jahren, als das Land Teil der Kolonie Französisch-Indochina war, entdeckten der Geologe Henri Mansuy und die Archäologin Madeleine Colani in Höhlen der nördlichen Provinzen Bac Son und Hoa Binh entsprechende archäologische Hinweise. Jedoch erst seit den 1960er Jahren wird intensiver nach Spuren steinzeitlicher Wildbeuter gesucht. So sind bis heute einige hundert Siedlungsplätze ans Licht gekommen, die aus der Zeitspanne von vor 25000 bis 7000 Jahren stammen, also nach europäischer Chronologie aus dem jüngeren Abschnitt der Altsteinzeit und der Mittelsteinzeit. Meist im Zuge größerer, tief in die Erdschichten eingreifender Bauvorhaben stoßen Archäologen auch in Mittel- und Südvietnam immer wieder auf entsprechende Stätten. Sie liegen häufig unter meterdicken Sedimentpaketen begraben, denn der Meeresspiegel war so weit gestiegen, dass sich die Küste vor 5000 Jahren im Vergleich zu heute etliche Kilometer weiter landeinwärts befand. Nach wie vor gibt es deshalb die meisten Fundstellen in den höhergelegenen Kalkgebieten des Nordens, insbesondere in Hoa Binh.

40000 Jahre alte Küchenabfälle an Küsten und Flüssen zeugen von Muschel- und Schneckenmahlzeiten

Das nach der Provinz benannte Hoabinhian ist die bekannteste altsteinzeitliche »Kultur« Vietnams. Ihr Verbreitungsgebiet umfasste nach heutigem Wissen aber fast ganz Südostasien mit Südchina, und darüber hinaus Teile von Nepal und Australien. Die jüngst entdeckte, mit über 43000 Jahren älteste Fundstelle mit eindeutigen Hoabinhian-Werkzeugen – aber leider keinen menschlichen Überresten – befindet sich in Südchina, bei Xiaodong. Doch nicht nur in Karstgebieten hinterließen die Menschen Spuren, sondern auch an Küsten und Flussläufen: mehrere Meter dicke Abfallschichten von Schneckengehäusen und Muschelschalen, die eindrücklich Zeugnis ablegen über die frühere Sammeltätigkeit. Dergleichen kennt man auch von europäischen Küsten; der dänische Zoologe Japetus Steenstrup prägte dafür im 19. Jahrhundert den Begriff »Kjökkenmøddinger«, zu Deutsch »Küchenabfallhaufen«.

Nicht einmal ein halbes Prozent aller archäologischen Hinterlassenschaften des Hoabinhian besteht aus pflanzlichen oder tierischen Hartmaterialien. Das lässt jedoch keinesfalls den Schluss zu, diese Jäger hätten keine hölzernen Speere oder Knochenspitzen gekannt – die schnelle Vergänglichkeit dieses Materials im feuchtwarmen Klima erklärt diesen Befund hinreichend. Auffällig ist aber, dass die entdeckten Steinwerkzeuge sehr einfach, ja geradezu primitiv wirken. Europas Wildbeuter verstanden es, Abschläge in unterschiedlichster Form, zum Beispiel als lange, schmale Klinge gezielt von einer Feuersteinknolle abzuhauen. Die Längskanten oder Enden dieser Abschläge wurden retuschiert, das heißt durch Schlag oder Druck mit einem Stein, Knochen- oder Gehörstück zu einem Stichel, Bohrer, Schaber oder Messer umgestaltet. Im Hoabinhian hingegen begnügte man sich zumeist damit, Flusskiesel, Gerölle oder Felsgestein grob zu bearbeiten. Dafür haben die Menschen nur wenige Teile vom Aus-

AUF EINEN BLICK GESELLSCHAFT IM GLEICHGEWICHT

- 1** Anders als im eiszeitlichen Europa entwickelten Jäger und Sammler in Vietnam und im angrenzenden Südostasien keine ausgefeilten Steinwerkzeuge, sondern verwendeten vor allem grob bearbeitete Geröllgeräte.
- 2** Anhand der Typen von Steinwerkzeugen unterscheiden Prähistoriker die drei Industrien Sonvian, Hoabinhian und Bacsonian. Vieles spricht dafür, dass sie keine aufeinanderfolgenden Stufen darstellen.
- 3** Das Fundgut mag täuschen: Die wichtigsten Werkstoffe waren sicherlich Bambus und Holz. Auch wirkten sich die Klimaveränderungen in Vietnam schwächer aus, erzeugten also nur wenig Anpassungsdruck.

gangsstück abgetrennt und sie nur selten weiterbearbeitet.

Die »Sumatralithen« gehören zu den wenigen Ausnahmen. Hierbei handelt es sich um Steine von ovaler bis rundlicher Form mit einer flachen Unterseite. Die Kanten wurden rundum oder zumindest partiell retuschiert. Kurzbeile fertigte man durch einfaches Spalten von Steinen; die dabei entstandene Fläche hat man ebenfalls retuschiert. Die dritte Klasse bilden Stücke, die Faustkeilen, also an einem Ende spitz zulaufenden, beidseitig retuschierten Werkzeugen ähneln, aber deutlich gröber wirken. Alle diese Artefakte eignen sich sehr gut zum Bearbeiten von Holz. Tatsächlich ergaben mikroskopische Analysen von Gebrauchsspuren, insbesondere der Art und Weise, wie die Schneiden aussplitterten, dass die »Faustkeile« zum Hacken, Raspeln, Polieren, Schleifen und Abspannen von Holz und Bambus verwendet wurden. Als Pick bezeichnen Archäologen schließlich den vierten Typ: ein spitzes, mandelförmiges bis annähernd dreieckiges Werkzeug. Vermutlich dienten Picks zum groben Zerschlagen von Holz und Knochen.

Bis auf diese Sonderfälle lassen sich bei den Steinwerkzeugen aber keine speziellen Designs erkennen. Entweder machte sich niemand die Mühe, sie zu verbessern, oder das Wissen um eine Innovation wurde nicht an die nächste Generation weitergegeben. Das Material – Stein – und der Zweck – Zerteilen, Zertrümmern und Schaben – genügen bereits, um die Form der Geräte zu erklären.

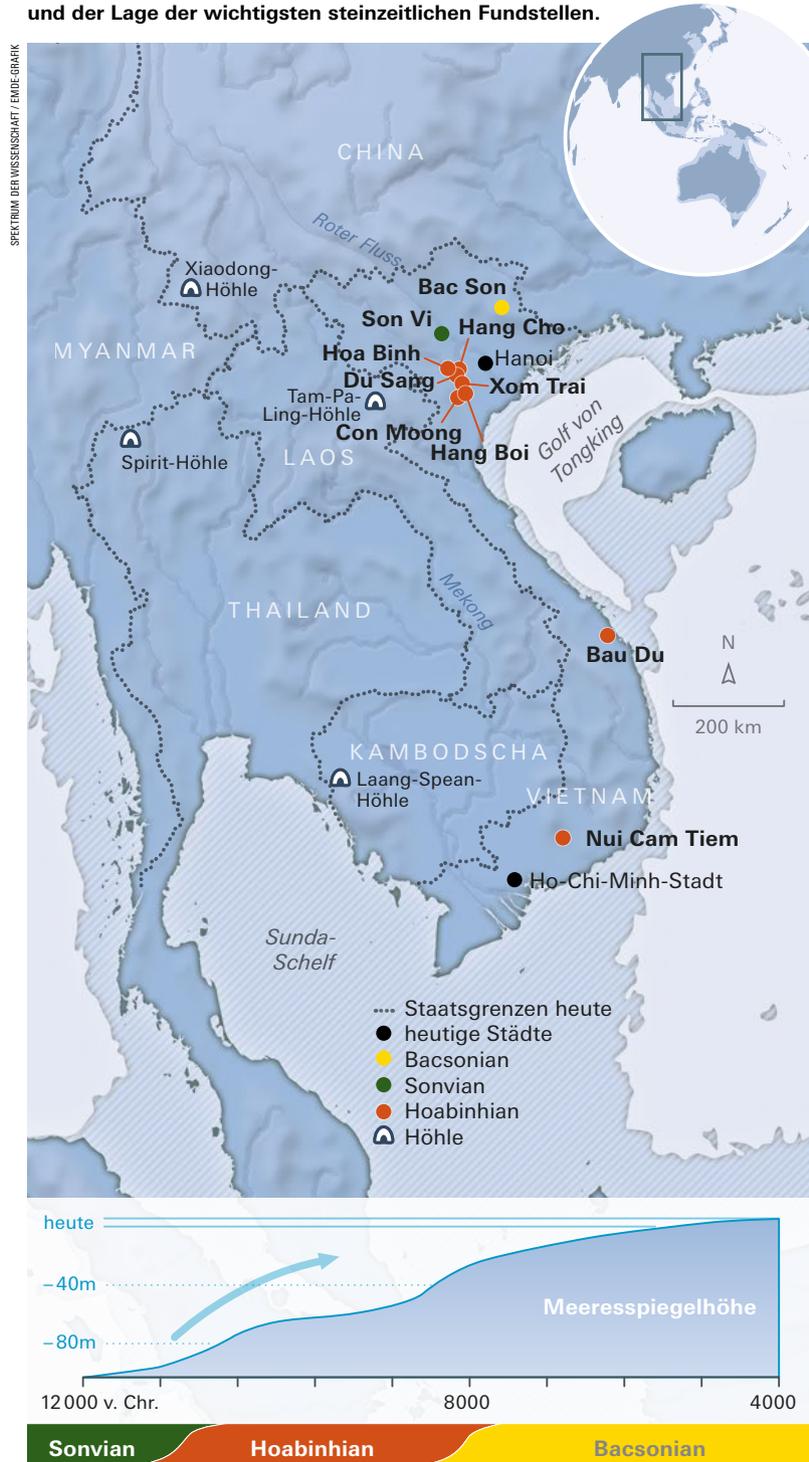
Noch einfachere Steinwerkzeuge: Stammen sie wirklich von einer noch etwas älteren Industrie?

Offenbar zeigen die aufgefundenen Steinwerkzeuge lediglich eine bestimmte technische Komponente einer bisher nicht genauer zu fassenden Wildbeutergesellschaft. Daher vermeiden es Experten, das Hoabinhian als Kultur zu bezeichnen. Wie auf einem Kongress 1994 in Hanoi vorgeschlagen, hat sich stattdessen der Begriff »Industrie« für diese leicht unterschiedlichen Fundinventare durchgesetzt. Gleiches gilt für die vorausgehende und die nachfolgende Entwicklungsstufe. In Vietnam wurde nämlich neben den Steinwerkzeugen des Hoabinhian in manchen Höhlen und bei archäologischen Geländebegehungen eine noch primitiver wirkende Steinwerkzeugindustrie entdeckt, das nach ihrem ersten Fundort benannte Sonvian. Kleine nicht weiter bearbeitete Abschläge und nur auf einer Seite retuschierte zerschlagene Kiesel oder Gerölle kennzeichnen diese Industrie, die keine Typen wie Sumatralith, Kurzbeil oder Pick kannte. Weil die Höhlenfunde aus Schichten dicht unter denen des Hoabinhian stammen, sehen vor allem vietnamesische Archäologen darin die Hinterlassenschaften einer etwas älteren Industrie.

Allerdings könnte die Verbreitung in dessen Bereich oder zumindest direkten Umfeld darauf hindeuten, dass es sich lediglich um eine bestimmte Variante des Hoabinhian handelt. Als Erklärung bieten sich spezifische Aktivitäten an. Auf ihren Wanderungen schlugen die Jäger und Sammler demnach bei Bedarf Geröll rasch zurecht, um beispielsweise eine Schlafstelle aus Bambus zu bauen. Erst wo man längere Zeit blieb, lohnte sich die Mühe,

etwas aufwändigere Werkzeuge zu fertigen wie die beschriebenen Hoabinhian-Geräte: Mit Kurzbeilen hat man beispielsweise Holzgeräte geglättet oder geschnitzt, mit den Faustkeilartigen und den Sumatralithen junge Bäume und Bambus gefällt. An einigen Fundplätzen wurden so stark zertrümmerte Tierknochen entdeckt, dass die Annahme naheliegt: Sie wurden mit Picks bearbeitet, um kleine Fleischportionen zu gewinnen, die man in Bambusgefäßen

Südostasien mit den landfesten Teilen des Sunda-Schelfs und der Lage der wichtigsten steinzeitlichen Fundstellen.





Archäologen und Helfer sieben 2008 bei Ausgrabungsarbeiten vor der Xom-Trai-Höhle nach Fundstücken (links). Eine massive Schicht von Mollusken wird am Eingang der Hang-Boi-Höhle untersucht (Bild unten). Fast alle Schalenreste stammen von nur zwei verschiedenen Landschneckenarten. Jedes Maßstabssegment entspricht 20 Zentimetern.

MIT FRODL. GEN. VON NGUYEN VAN VIET



MIT FRODL. GEN. VON NGUYEN VAN VIET

die Siedlungsschichten auch Holz, Holzkohle oder andere organische Materialien, die sich mit der Radiokohlenstoffmethode datieren lassen. Gelegentlich kommen sogar Überreste von Gräbern zum Vorschein. Das Knochenmaterial daraus kann ebenfalls datiert werden. Das bisher mit etwa 17500 Jahren älteste Grab entdeckten vietnamesische Ausgräber in der Xom-Trai-Höhle in der Provinz Hoa Binh. In dieser Region liegt auch die Con-Moong-Höhle mit ihren über acht Meter mächtigen, mit archäologischen Funden durchsetzten Sedimentschichten, ein Glücksfall für die vietnamesische Archäologie. Die untersten Schichten stammen den Artefakten nach aus dem Sonvian. Zudem wurden darin sieben Gräber mit menschlichen Skelettresten und andere organische Funde ausfindig gemacht, die eine Datierung ermöglichten: Sie stammen aus der Zeit von vor 16300 bis vor 13500 Jahren. Organisches Material aus Schichten des darüber liegenden Hoabinhian waren 10500 Jahre alt; und schließlich wurde das Alter der oberen Schichten, das Beile mit geschliffenen Schneiden enthielt, auf mindestens 9500 Jahre vor heute datiert.

In den meisten Gräbern jener Zeit stößt man nur noch auf massive Knochenteile wie Schädel oder Langknochen und auf die mit sehr hartem Zahnschmelz ausgestatteten Zähne, denn die feineren Knochen sind zumeist vergangen. Während aller drei Phasen – Sonvian, Hoabinhian und Bacsonian – bettete man die Verstorbenen auf die Seite, winkelte ihre Beine an und bog den Oberkörper zu den Knien; mitunter wurden diese so genannten Hockerbestattungen mit Röteln bestreut. Die Stellung der Toten und den Farbschmuck kennen Prähistoriker auch aus anderen Teilen der Welt. Wir können daraus zwar auf besondere Beisetzungsrituale schließen, Hinweise auf einen Jenseitsglauben liefern aber nur Grabbeigaben. Tatsächlich stießen vietnamesische Archäologen zumindest in Ausnahmefällen auf einzelne Steinwerkzeuge und Molluskenschalen, so etwa in der Con-Moong-Höhle.

kochte. Zogen die Gruppen zu einem anderen Lagerplatz weiter, blieben die Steinwerkzeuge zurück, denn es gab überall genug Geröll, und man wollte keinen unnötigen Ballast mitschleppen. Mitunter stoßen die Ausgräber zusätzlich zu den Artefakten des Hoabinhian auch auf Steine mit angeschliffenen Schneiden oder parallelen Ritzungen sowie auf Bruchstücke schnur- oder ritzverzierter Keramik. An einigen Plätzen liegen die Fundschichten über denen des Hoabinhian, weshalb manche Wissenschaftler dieses wiederum nach einem bestimmten Fundgebiet benannte, aber im Verbreitungsgebiet des Hoabinhian liegende »Bacsonian« als eigenständige Entwicklung sehen. Andere betrachten es eher als Endphase des Hoabinhian, in der sich Fremdeinflüsse zeigen.

Das Alter der drei Industrien genauer zu erfassen und in einen Zusammenhang zu stellen, ist anhand der Steinwerkzeuge allein kaum möglich. Doch mitunter enthalten

Bei einigen Gräbern könnte es sich um Sekundärbestattungen handeln. Das heißt, dass der Tote nach einer bestimmten Zeit wieder aufgedeckt wurde und alle noch vorhandenen größeren Knochen oder aber nur bestimmte Knochenpartien an anderer Stelle erneut beigesetzt wurden. Bei der Ausgrabung derartiger Bestattungen fehlen dann Teile des Skeletts, ohne dass es etwa Hinweise auf eine Störung des Grabs durch Tiere gibt, und wenn die aufgefundenen Knochen so gut erhalten sind, dass auch Verwitterung als Grund des Fehlens ausscheidet. Diese besondere Art der Behandlung des Leichnams war bis in die jüngste Zeit in Vietnam weit verbreitet.

Insgesamt unterscheiden sich die drei altsteinzeitlichen Industrien also kaum voneinander, das Sonvian war vielleicht sogar nur ein bestimmter Aspekt der Lebensweise im Hoabinhian. Dass seine Schichten unter denen des Hoabinhian zu Tage kommen, spricht nicht dagegen: Eine bestimmte Höhle mag zunächst nur gelegentlich aufgesucht worden sein, später aber diente sie als fester Lagerplatz. Im Bacsonian kommen zwei neue technische Elemente hinzu: der Steinschliff und manchmal auch die

Nutzung von Keramik. Nach jetzigem Kenntnisstand stammen beide aus dem nördlich an Vietnam angrenzenden Raum, dem heutigen Südchina, und sind dort mit dem sehr frühen Aufkommen von Landwirtschaft und Sesshaftigkeit verbunden. Der archäologische Befund in Vietnam ist jedoch eindeutig: Die wildbeuterisch lebende Bacsonian-Bevölkerung übernahm diese Fremdelemente. Die neolithische Lebensweise begann in Vietnam jedoch erst viel später, frühestens um 2500 v. Chr.

Wer die einfach wirkenden Steinwerkzeuge der vietnamesischen Altsteinzeit mit den fraglos aufwändiger gearbeiteten aus Europa vergleicht, kann leicht einem falschen Eindruck erliegen. Ursprünglich dürften diese Artefakte nur einen Bruchteil der Gerätschaften ausgemacht haben. Noch heutzutage spielen Bambus und Holz in Südostasien eine sehr große Rolle als Werkstoff. Beide sind vielerorts verfügbar, und das hartfaserige Süßgras Bambus, dessen »Stämme« 15 bis 20 Zentimeter Durchmesser erreichen, lässt sich außerordentlich stark belasten.

Rezente Jäger- und Sammlervölker liefern Hinweise auf die vielfältige Verwendung von Holz und Bambus. In den

Typische Steinwerkzeuge

Die Steingeräte auf der linken Seite stammen von verschiedenen Fundstellen des Sonvian (1 bis 4); Nummer 5 bis 7 rechts werden dem Hoabinhian, Nummer 8 dem Bacsonian oder Post-Hoabinhian zugeordnet.

7 diskusförmiges
Steinwerkzeug
(Länge: 7,3 Zentimeter)



1 einfaches Hauwerkzeug
(End-Chopper,
Länge: 13,6 Zentimeter)



2 seitlich retuschiertes
Hauwerkzeug
(Side-Chopper,
Länge: 11,3 Zentimeter)



5 zweiflächig bearbeiteter
»Sumatralith«
(Länge: 9,2 Zentimeter)



3 »Viertelgeröll«
(Länge: 7,4 Zentimeter)



4 an drei Seiten retuschiertes
Geröllwerkzeug
(Chopping-Tool,
Länge: 11,4 Zentimeter)



6 Kurzbeil
(Länge: 5,9 Zentimeter)



8 Beißdinge
mit geschliffener Schneide
(Länge: 13 Zentimeter)

Sonvian

Hoabinhian

Bacsonian

1930er Jahren hielt sich der österreichische Ethnologe Hugo A. Bernatzik im heutigen Laos bei den Phi Tong Luang auf (zu Deutsch: »die Geister der gelben Blätter«). Ihre Kochgefäße, Messer, Grabstöcke und Speere bestanden zumeist aus Bambus oder Holz, nur selten benutzten sie Steine als Werkzeuge. Es ist mehr als plausibel, dass schon die Jäger und Sammler im Zeitraum von etwa 25 000 bis 5000 Jahren vor heute, also des Sonvian, Hoabinhian und Bacsonian, diese Techniken kannten. Vermutlich gibt die Bezeichnung Altsteinzeit also eine eurozentrische Sichtweise wieder. Auch wenn es sich nicht anhand von Funden beweisen lässt, würde jener Epoche wohl eher die Bezeichnung Bambuszeit gerecht.

Das verweist aber auch auf den vielleicht größten Unterschied zwischen der Nordhemisphäre und Südostasien

Hockerbestattung eines Erwachsenen im Abri von Du Sang mit Blickrichtung nach Süden.



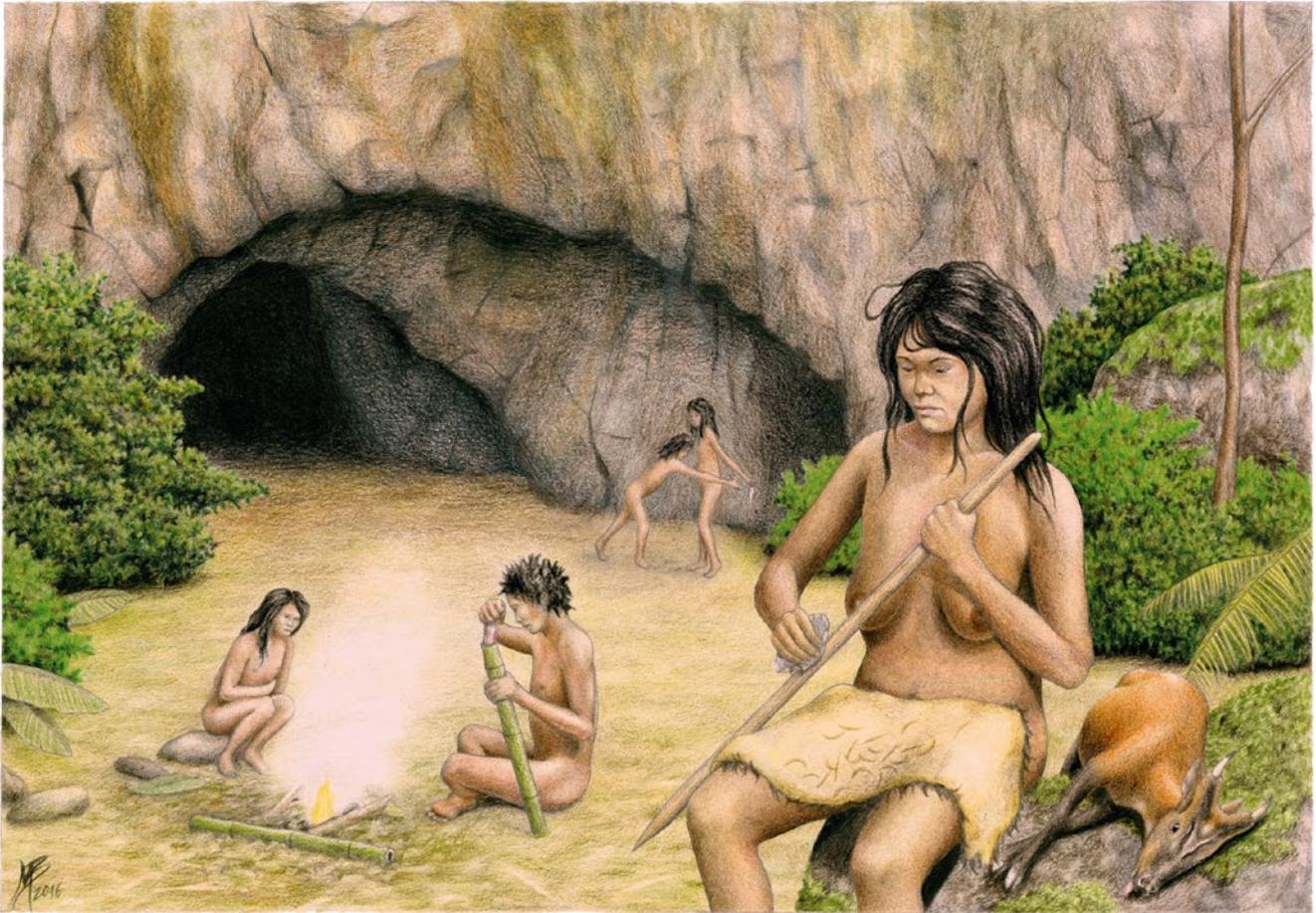
MIT FELD BEI VON NGUYEN VAN VIET

in der Altsteinzeit: Während in Europa und Nordamerika die Gletscher regierten, lag die Durchschnittstemperatur in Vietnam nur drei bis vier Grad Celsius unter der heutigen. In seinem Norden erreichte die mittlere Temperatur mehr als 20 Grad, im Süden mehr als 24 Grad. Damit herrschten auch damals schon subtropische und tropische Verhältnisse. Während der Kaltzeit dürften in Vietnam weniger Niederschläge gefallen sein, denn die Gletscher der Nordhemisphäre entzogen der Atmosphäre enorme Wassermengen. Archäobotanische und geologische Untersuchungen zeitgleicher Bodenschichten zeigen aber, dass sich Fauna und Flora Südostasiens dennoch kaum von der heutigen unterschieden. Das war vermutlich einerseits ein Effekt der starken Höhengliederung des Festlands, andererseits eine Auswirkung des Monsuns: Es existierten viele unterschiedliche Landschaften mit ganz unterschiedlichen, dennoch ausreichenden Niederschlagsmengen. Somit bot eine Fülle von Ökotypen Wildbeutern reichlich Nahrung, von immergrünen Laubwäldern über Mangrovenwälder und Sümpfe an der Küste bis zu dichtem Bambusdschungel. Auch heute noch ist Vietnam eines der Länder mit der höchsten Biodiversität weltweit, und Jahr für Jahr werden unbekannte Tierarten, sogar Tiergattungen, entdeckt.

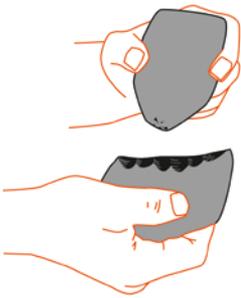
Das günstige Klima und reiche Nahrungsangebot zwangen nicht zu diffizilen technischen Innovationen

In einem solchen Klima zersetzt sich alles organische Material schnell und rückstandslos. Nur dort, wo mächtige Sedimentpakete es überdeckt haben, ein hoher Grundwasserstand oder das Kleinklima einer Höhle für dauerhaft feuchte Lagerungsbedingungen sorgten, blieben sie erhalten. Solche glücklichen Umstände herrschten etwa in der Spirit-Höhle in Nordthailand oder in der Laang-Spean-Höhle in der kambodschanischen Provinz Battambang. Dort erkundeten Archäozoologen, was die Menschen vor allem jagten: Hirsche, Wildrinder, Schweine, Stachelschweine und Affen. Schildkröten, Süßwasser- und Landschnecken sowie Fische bereicherten den Speisezettel. Man sammelte verschiedene Nüsse, Kastanien, Kürbisse, Bohnen und Erbsen. Ebenso sind Bambusschösslinge als Nahrungsmittel denkbar. Wohl zum Würzen nahm man Pfeffer. Blätter des Betelpfeffers könnten wie heute als Antiseptikum oder Rauschmittel verwendet worden sein.

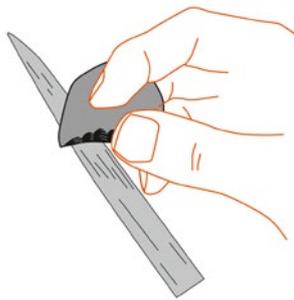
Die Wildbeuter Südostasiens lebten vor 25 000 bis vor 5000 Jahren also unter ganz anderen Bedingungen als jene in Europa. Statt sich einer lebensfeindlichen Umwelt anpassen zu müssen, herrschten bis zum Beginn der Jungsteinzeit vor etwa 4500 Jahren sehr statische Klimaverhältnisse. Das kann erklären, warum technische Innovationen wie Pfeilschaftglätter oder spezielle Steinwerkzeuge wie Bohrer, gestielte Spitzen und Stichel an den Fundplätzen fehlen. Es gab dafür einfach keine Notwendigkeit. Die Phi Tong Luang, die Bernatzik Ende der 1930er Jahre studiert hatte, sammelten im dichten Wald vor allem pflanzliche Nahrung wie Bambusschösslinge und aßen das Mark wilder Sagopalmen. Sie griffen Ratten, Frösche, Kröten, Eidechsen, Schildkröten und anderes Kleingetier auf, wenn sie ihnen begegneten, oder fingen sie mit



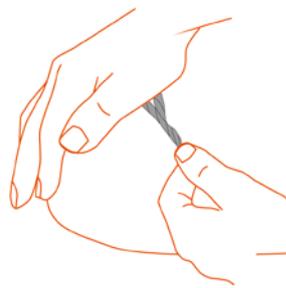
INGO KRAFT UND JOHANN FRIEDRICH TOLKSDORF



Retuschieren einer Arbeitskante (schwarz) mit einem Schlagstein



Glätten der Oberfläche eines Kurzspeeres



Verzwirnen von Pflanzenfasern für einen Faden oder eine Schlinge

Die Illustration zeigt Wildbeuter vor einer Höhle: Eine Frau glättet den Schaft eines Kurzspeers oder Grabstocks. Ein Mann stopft Fleisch, das am Feuer gegart werden soll, in ein Bambusrohr. Vorn rechts ein erbeuteter Zwergmuntjak, ein Muntjak. Die Menschen damals kannten eine Reihe Fertigkeiten, um Werkzeuge herzustellen. Links einige Beispiele.

einfachen Schlingen; eine richtige Jagd gab es hingegen selten. Diese Art der Lebensbewältigung kann als sehr einfache Variante einer Wirtschaftsform charakterisiert werden, die sich im Gleichgewicht befindet. Es fehlten praktisch alle Faktoren, die größere Wandlungsprozesse hätten anstoßen können. Letztlich dürfte das der Grund sein, warum Archäologen keine Kulturen, sondern nur Varianten eines insgesamt sehr gleichförmigen, einfachen Steinwerkzeugspektrums vorfinden. Vermutlich gab es durchaus verschiedene Gruppen, die sich mit einem bestimmten »Wirgefühle« ausgestattet von anderen Menschengruppen abgrenzten. Sie lassen sich jedoch mit den Mitteln der Archäologie bisher nicht unterscheiden. ◀

QUELLEN

- Bernatzik, H. A.:** Die Geister der gelben Blätter. Forschungsreisen in Hinterindien. F. Bruckmann, München 1938
- Narr, K. J.:** Grobe Steinartefakte. Steinzeitfragen Südostasiens. In: Beiträge zur Allgemeinen und Vergleichenden Archäologie 2. C.H.Beck, München 1980, S. 29–64
- Reinecke, A.:** Das Paläolithikum bis zum Aufkommen von Keramik. In: Schätze der Archäologie Vietnams. Begleitband zur Sonderausstellung. Nünnerich-Asmus, Mainz 2016, S. 42–66
- Seitz, S.:** Überlebenskampf oder dynamische Daseinsbewältigung? Vierzig Jahre Wildbeutereforschung. Kleine Schriftenreihe des Freiburger Instituts für Paläowissenschaftliche Studien, Heft 10. Wissenschaft und Öffentlichkeit, Freiburg 2010



FREISTETTERS FORMELWELT DAS WICHTIGSTE OBST DER PHYSIKGESCHICHTE

Die Anziehungskraft großer Planeten kann einen kleinen Kometen völlig aus der Bahn werfen. Aber Newton und viele Nachfolger haben Ordnung in das Chaos gebracht.

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

► spektrum.de/artikel/1496913

Es gibt viele Geschichten darüber, wie Isaac Newton auf seine berühmte Formel zur Berechnung der Gravitationskraft kam. War es der sprichwörtliche Apfel? Oder eine Wette im Kaffeehaus, die Newton mit seiner Mathematik auflösen sollte? Oder die Fragen des königlichen Astronomen über die Bewegung von Kometen? Schon zu Newtons Lebzeiten haben sich so viele Legenden gebildet, dass Wahrheit und Fiktion heute nicht mehr zu trennen sind. Aber die Kometen haben immerhin später eine wichtige Rolle bei einem der ersten großen Triumphe von Newtons Gravitationsformel gespielt.

1705 wies Edmond Halley in einer Arbeit mit Newtons Formel nach, dass ein 1682 beobachteter Komet identisch mit kosmischen Brocken war, die schon 1531 und 1607 am Himmel erschienen waren. Das kam damals einer Sensation gleich. Kometen waren notorisch unvorhersagbar; sie tauchten ohne Vorwarnung am Himmel auf und verschwanden ebenso plötzlich wieder. Erst Newtons Formel machte ihre wilden Bewegungen berechenbar – was es Halley ermöglichte, die Rückkehr des Kometen für das Jahr 1758 vorherzusagen. Seine Prognose trat ein, und das Objekt heißt heute Halleyscher Komet.

Das Problem, das die Identifikation der Himmelschaoten damals so schwierig machte, beschäftigt die Wissenschaftler immer noch. Kommt ein Komet einem der großen Planeten nahe, gerät er durch dessen gravitativen Einfluss auf eine ganz andere Bahn als vorher. Wie soll man wissen, ob der aktuelle Komet mit einem Jahrzehnte zuvor gesichteten identisch ist?

Eine Antwort fand um 1895 der französische Astronom François Félix Tisserand (*Spektrum* August 2005, S. 86). Er entdeckte eine nützliche Rechengröße:

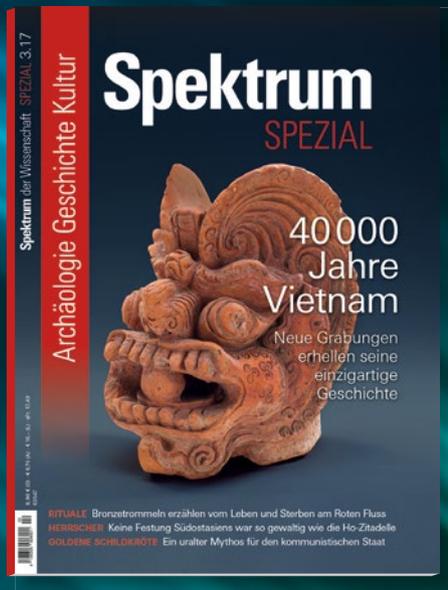
$$T_p = \frac{a_p}{a} + 2 \cos i \sqrt{\frac{a}{a_p} (1 - e^2)}$$

In einem vereinfachten Dreikörperproblem ist der Tisserand-Parameter T_p näherungsweise eine Erhaltungsgröße, so wie zum Beispiel die Gesamtenergie. Betrachtet man die Bahn eines Kometen (in der Formel gegeben durch die große Halbachse a der Bahnellipse, ihre Exzentrizität e und die Neigung i der Bahnebene gegen diejenige des Planeten) und die Bahn eines großen Planeten (gegeben durch deren große Halbachse a_p), dann ist der Tisserand-Parameter vor und nach der Begegnung des Kometen mit dem Planeten annähernd der gleiche, auch wenn die Bahn selbst vielleicht ganz anders aussieht.

So konnte man ohne langwierige Bahnberechnungen entscheiden, ob unterschiedliche Beobachtungen zum selben Kometen gehören oder nicht. Die Berechnungen sind mit heutigen schnellen Computern kein Problem mehr; der Tisserand-Parameter wird aber trotzdem noch verwendet. Mit ihm kann man zum Beispiel Asteroiden und Kometen klassifizieren. Kometen der so genannten »Jupiter-Familie«, deren Bahnen alle von der Gravitationskraft des Jupiters beeinflusst worden sind, haben einen ähnlichen Tisserand-Parameter, der sich von dem anderer Kleinkörper unterscheidet. Und auch Mathematiker müssen diese Größe berücksichtigen, wenn sie die Flugbahnen von Raumsonden berechnen wollen, die sich mit einem Swing-by-Manöver Schwung durch die Gravitationskraft eines anderen Planeten holen: Nach dem nahen Vorbeiflug an einem Planeten stehen ihnen nicht beliebige Bahnen zur Verfügung, sondern nur solche, die den Wert des Tisserand-Parameters unverändert lassen.

Die Geschichte von Newtons fallendem Apfel mag ein Mythos sein. Doch sollte sie tatsächlich stimmen, dann war dieser Apfel vermutlich das wichtigste Stück Obst der Menschheitsgeschichte. Es inspiriert Wissenschaftler seit mehr als 350 Jahren zu immer neuen Erkenntnissen über das Universum.

Spektrum SPEZIAL



**JETZT NEU
ALS PRINT-,
DIGITAL- ODER
KOMBIABO**

Die **Spektrum**-Spezial-Reihen fassen jeweils Themen aus den drei großen Bereichen »Lebenswissenschaften«, »Naturwissenschaft« und »Kulturwissenschaften« verständlich und informativ zusammen. Jahresabo je Reihe (4 Ausgaben pro Jahr): Print € 29,60; Digital € 21,-; Kombiabo Print + Digital € 33,60 (Printpreise inkl. Versandkosten Inland)



Bestellen Sie jetzt Ihr Spezialabo!

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

www.spektrum.de/spezialabo

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN DURCHBLICK-POLYEDER

Mit unglaublicher Geduld gelingt es, räumliche Körper herzustellen, die auch den Blick auf verborgene Teilflächen zulassen.

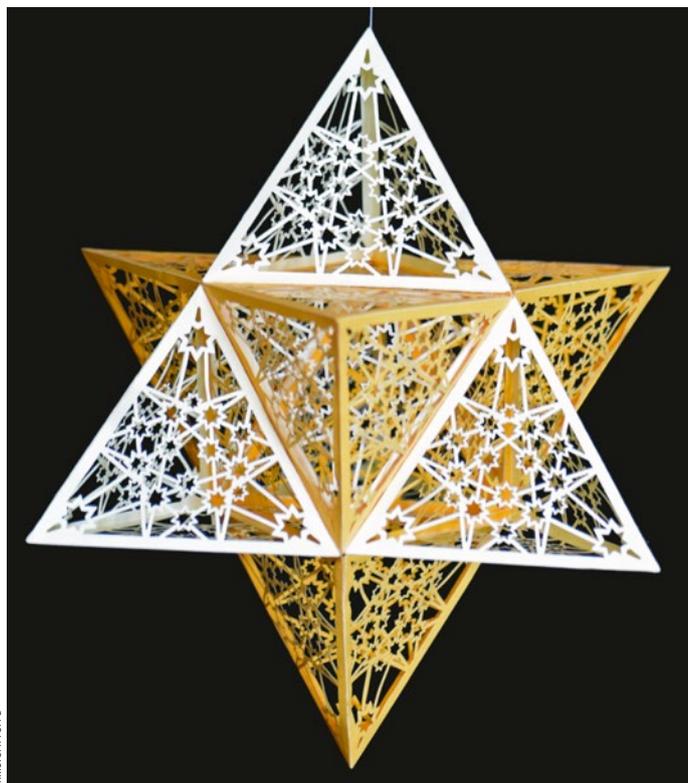


Christoph Pöppe ist Spektrum-Redakteur für Mathematik und Computertechnik.

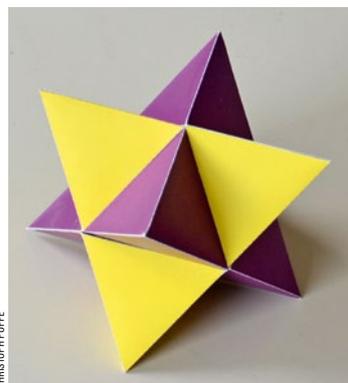
» spektrum.de/artikel/1496911

► Eigentlich ist Ulrich Mikloweit Chemiker; sein Geld verdient er als Umwelt- und Abfallbeauftragter des Klinikums der Universität Essen. Aber auch Chemiker müssen sich gelegentlich mit Geometrie befassen, und zwar wenn es um Kristallstrukturen geht. In diesem Zusammenhang bekam der Chemiestudent Ulrich Mikloweit 1974 die Aufgabe, in Gedanken alle Flächendiagonalen in einem Würfel zu ziehen und zu ermitteln, zu welchen Körpern sich diese insgesamt zwölf Strecken fügen. Die Antwort: Es handelt sich um zwei regelmäßige Tetraeder, die einander durchdringen (Bild unten).

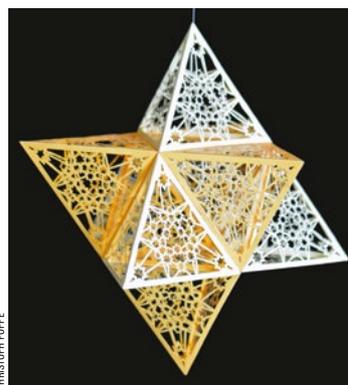
Bereits Johannes Kepler (1571–1630) beschrieb diesen Körper und gab ihm seinen heute gebräuchlichen Namen »Stella octangula« (achtspitziger Stern). Er ist zugleich das einfachste Beispiel für ein äußerst fruchtbares Konzept: die Dualität. Im Prinzip macht man aus einem Polyeder (einem von ebenen Flächen begrenzten Körper) ein anderes, indem man alle Flächen durch Ecken ersetzt und umgekehrt. Wenn bei dem ursprünglichen Polyeder zwei Flächen eine gemeinsame Kante haben, dann sind bei dem neuen (dem »dualen«) Polyeder die zugehörigen Ecken durch eine Kante verbunden und umgekehrt.



CHRISTOPH PÖPPE



CHRISTOPH PÖPPE



CHRISTOPH PÖPPE

Die Stella octangula

Der Körper besteht aus zwei einander durchdringenden regulären Tetraedern. In der Schrägansicht (unteres kleines Bild) erkennt man, dass alle Verbindungslinien von einer gelben zu den jeweils benachbarten weißen Ecken die Kanten eines Würfels bilden. Das Papier für die Seitenflächen ist ausnahmsweise nicht mit der Schere, sondern mit dem Laser geschnitten.



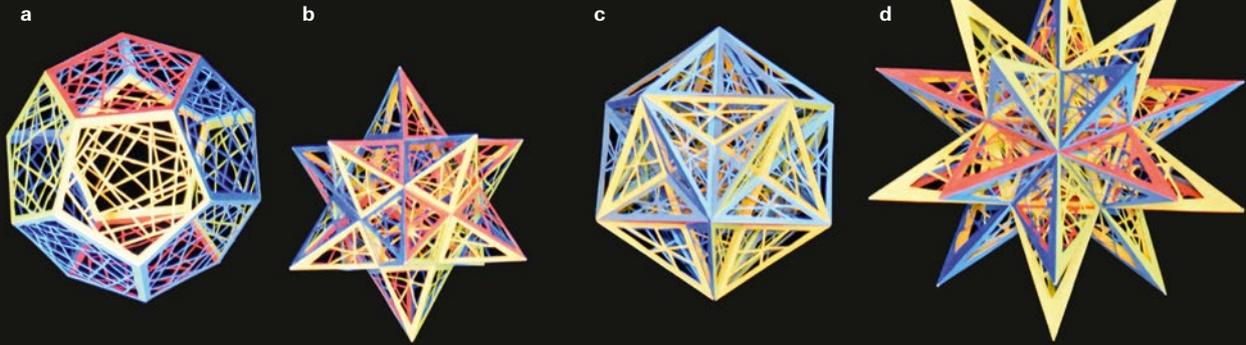
Dies ist nur ein
kleiner Teil der
Werke von Ulrich
Mikloweit.



Kepler-Poinsot-Sternkörper

Erweitert man durch Verlängerung der Kanten die fünfeckigen Flächen des Dodekaeders (a) zu Fünfsterne (Pentagrammen), so entsteht das kleine Sterndodekaeder (b). Das große Dodekaeder (c) ist wie das gewöhnliche Dodekaeder aus zwölf Fünfecken zusam-

mengesetzt, die sich jedoch gegenseitig durchdringen. Das große Sterndodekaeder (»Ikosaederstern«, d) besteht aus 20 Pentagrammen, die sich jeweils zu dritt in einer Ecke treffen. Nicht abgebildet: das große Ikosaeder aus 20 einander durchdringenden Dreiecken.



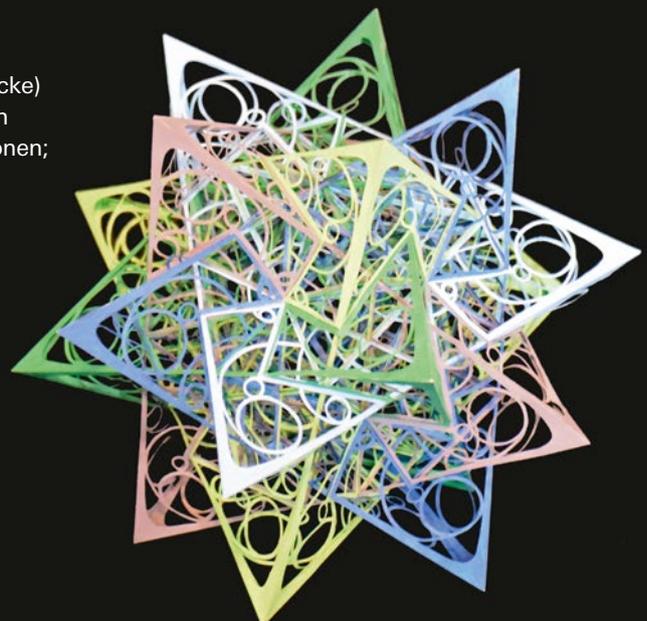
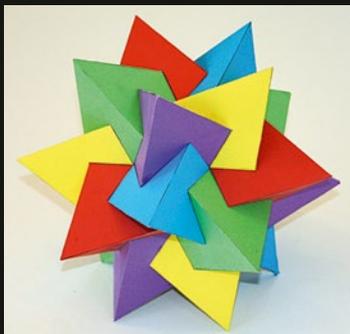
Diese vorläufige Beschreibung sagt noch nichts über die Größenverhältnisse; bei einigermaßen regelmäßigen Körpern ist es jedoch möglich und sinnvoll, das duale Polyeder so zu bemessen, dass die Kanten von altem und neuem Polyeder sich genau in der Mitte rechtwinklig schneiden. Das ist insbesondere bei der Stella octangula der Fall. Das Tetraeder ist dual zu sich selbst, während die übrigen vier platonischen Körper paarweise – Würfel zu Oktaeder und Dodekaeder zu Ikosaeder – zueinander dual sind.

Auf den ersten Blick sieht man bei der Stella octangula jedoch nicht die vier Dreiecke, aus denen jedes Tetraeder besteht, sondern viele kleine. Der innere Teil jedes Dreiecks ist, da vom jeweils anderen Körper verdeckt, dem Blick entzogen. Das missfiel dem Studenten, und er sann auf Abhilfe: Man gehe zu durchbrochenen Flächen über, die wie Spitzendeckchen oder Gittertore den Durchblick auf das Darunterliegende zulassen.

Die Idee hatte Erfolg und fand alsbald weitere Anwendung. Es gibt nämlich viele weitere Polyeder, die sich

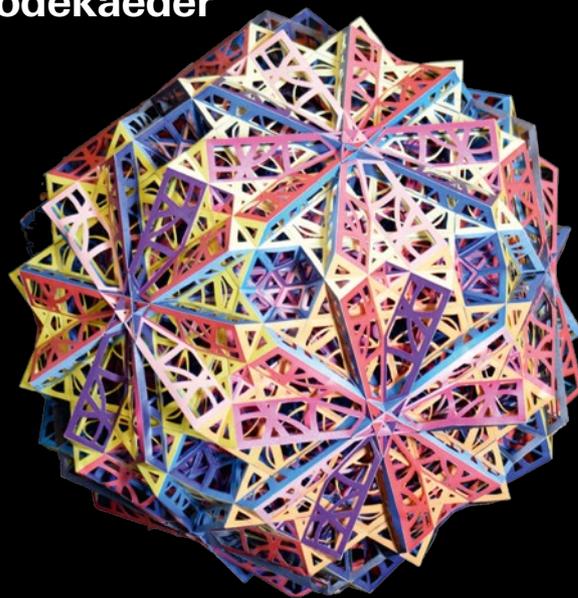
Tetraederfünfling

Gewisse Diagonalen (Verbindungslinien von Ecke zu Ecke) des Dodekaeders bilden zusammen fünf Tetraeder. Von diesem Körper gibt es zwei spiegelbildlich gleiche Versionen; die durchbrochene wie die konventionelle Realisierung entsprechen beide derselben Version.



Das große abgestumpfte Ikosidodekaeder

Wie bei uniformen Polyedern üblich, ist der Name sinnvoll gewählt, trägt aber ohne umfangreiche theoretische Vorbereitung nahezu nichts zum Verständnis bei. In diesem Körper (Nummer 108 bei Wenninger) treffen sich in jeder Ecke ein Quadrat (rote Farbtöne im großen Bild), ein Sechseck (blau) und ein Zehnstern (gelb), genauer gesagt ein $(10/3)$ -Stern, das heißt, seine Seiten sind die Diagonalen des regelmäßigen Zehnecks, die jeweils von einer Ecke zur drittnächsten verlaufen. Frappierend ist das Polyeder in der üblichen Darstellung mit undurchsichtigen Flächen kaum wiederzuerkennen (kleines Bild).



LINKS: ROBERT WEBB, WWW.SOFTWARE3D.COM/STELLA.PHP; (COMMONS:WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:GREAT_TRUNCATED_ICOSIDODECAHEDRON.PNG); RECHTS: CHRISTOPH POPPE

zwar großer Symmetrie erfreuen, aber darunter leiden, dass große Teile ihrer Flächen im Verborgenen liegen. Einige unter ihnen gehen ebenfalls auf Kepler sowie auf Louis Poinsot (1777–1859) zurück (Bild links oben).

Dafür muss man sich allerdings von der Vorstellung verabschieden, ein Polyeder sei ein Volumen, das von ebenen Flächen begrenzt werde in dem Sinn, dass auf einer Seite jeder Fläche das Innere des Körpers sei und auf der anderen Seite die Außenwelt. Vielmehr ist ein Polyeder zu verstehen als eine Menge von ebenen Flächen mit der Eigenschaft, dass jede Seite einer Fläche zugleich Seite genau einer anderen Fläche ist: Keine Seite bleibt unverbunden, und jeder Kante des Polyeders liegen genau zwei Flächen an. Es ist nicht verboten, dass diese Flächen einander durchdringen, und innen und außen sind möglicherweise nicht mehr klar zu unterscheiden. Als regelmäßiges Vieleck gilt alles, was gleiche Seiten und gleiche Winkel hat; das schließt auch sternförmige Vielecke ein.

Uniforme Polyeder:

Symmetrie mit Selbstdurchdringung

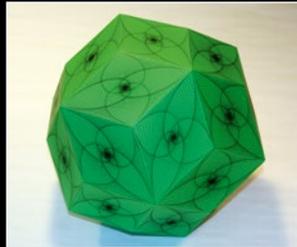
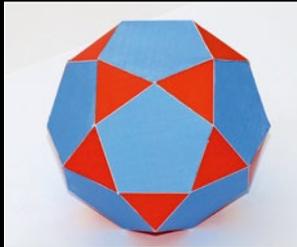
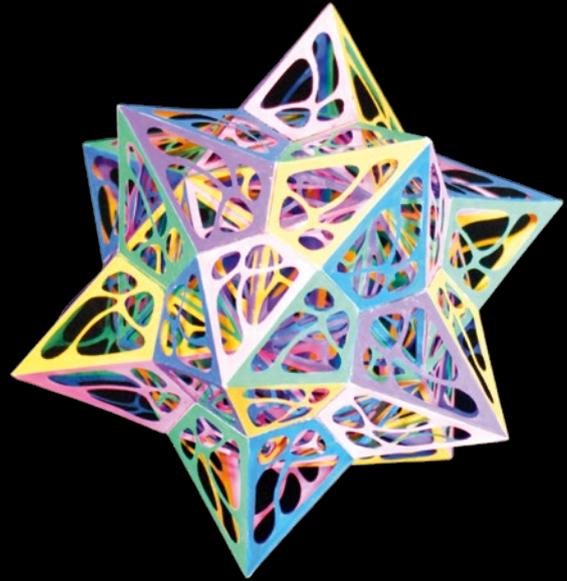
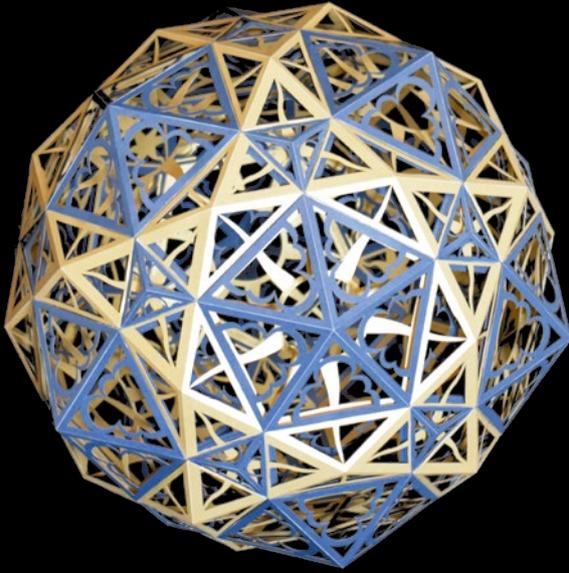
Besonders interessant und ansehnlich sind unter diesen verallgemeinerten Polyedern diejenigen, die von regelmäßigen Vielecken – im erweiterten Sinn – begrenzt sind und über ein vollständiges Sortiment an Symmetrien (Drehungen und Spiegelungen) verfügen, so dass man den ganzen Körper auf sich selbst und jede Ecke auf jede beliebige andere abbilden kann. Sie heißen uniforme Polyeder, und es gibt immerhin 75 Stück von ihnen, eingeschlossen die klassischen platonischen und archimedischen (halbregelmäßigen) Körper, nicht eingeschlossen die unendlich vielen Prismen und Antiprismen sowie deren Verwandte, bei denen die dreieckigen oder viereckigen Wände einan-

der durchdringen. Ebenfalls nicht zu den uniformen Polyedern zählen die Durchdringungen mehrerer (zum Beispiel) platonischer Körper, die zwar die Symmetriebedingungen erfüllen, aber in mehrere vollständige Polyeder zerlegbar sind (Bild links unten).

Nachdem Ulrich Mikloweit mit seiner Methode der durchbrochenen Flächen etliche naheliegende Körper hergestellt hatte, stieß er auf das Kultbuch der Polyederszene: »Polyhedron Models«. Und damit nahm das Schicksal seinen Lauf.

Das Buch stammt von Magnus Wenninger (1919–2017), Benediktinermönch in der St. John's Abbey in Collegeville (Minnesota). Der hatte die Abgeschiedenheit des klösterlichen Lebens – damals noch in Nassau (Bahamas) – genutzt, um in den 1960er Jahren Papiermodelle sämtlicher uniformen Polyeder herzustellen, nur wenige Jahre, nachdem Harold Scott MacDonal Coxeter und zwei seiner Mitarbeiter erstmals deren vollständige Auflistung veröffentlicht hatten. In »Polyhedron Models« zeigte Wenninger 1971 nicht nur Fotos von jedem seiner Objekte, sondern lieferte auch Bauanleitungen mit Maßangaben. Da er außer den uniformen Polyedern noch ein paar andere interessante Körper mitaufnahm, enthält sein Buch stolze 119 Polyeder. Und Ulrich Mikloweit machte sich auf, sie alle nachzubauen.

Nur ist sein Prinzip der durchbrochenen Flächen weitaus mühsamer umzusetzen als Wenningers Verfahren; und selbst der hatte für seine Sammlung rund zehn Jahre gebraucht. Denn während gewöhnliche Polyederbauer die Freiheit haben, verdeckte Flächenteile von vornherein wegzulassen, muss Mikloweit sie alle ausführen; und jedes von ihnen ist nicht einfach ein Stück buntes Papier, sondern dem Durchblick zuliebe mit zahlreichen – und der Ästhetik zuliebe kunstvoll geformten – Löchern versehen.

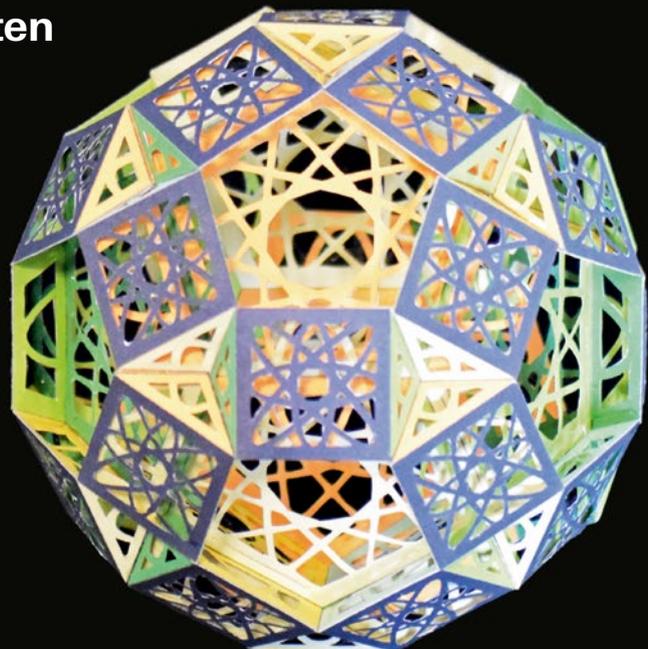


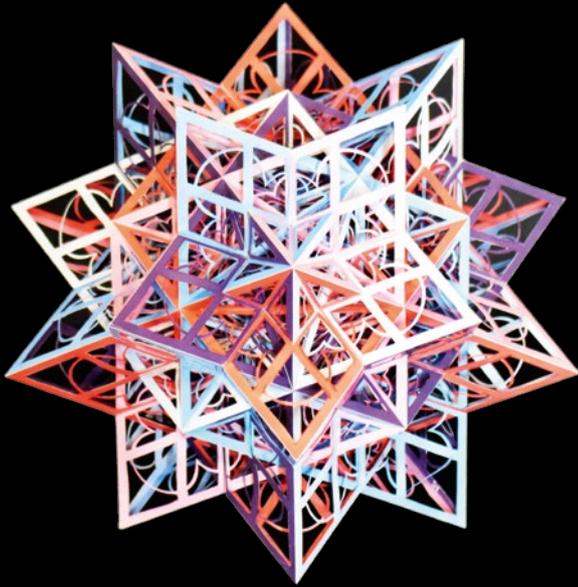
Rhombentriakontaeder

Das Bild links oben zeigt einen archimedischen Körper, das Ikosidodekaeder (gelb), zusammen mit seinem Dual, dem gewöhnlichen Rhombentriakontaeder (blau); die kleinen Bilder unten zeigen die beiden Partner einzeln. Das mittlere (Mitte) und das große (rechts) Rhombentria-

Neue Flächen zu alten Kanten

Man kann die Kanten eines archimedischen Körpers, des kleinen Rhombenikosidodekaeders (kleines Bild; siehe **Spektrum** März 2012, S. 61), durch ebene Zehnecke verbinden und dann die ursprünglichen Fünfecke und Dreiecke weglassen, während die Quadrate erhalten bleiben. Es entsteht ein neues, diesmal sogar uniformes Polyeder.





CHRISTOPH PÄPPE

kontaeder bestehen ebenfalls aus 30 Rauten, die einander allerdings intensiv durchdringen. Die Flächen des großen Rhombentriakontaeders entstehen durch Vergrößern (bei unverändertem Mittelpunkt) derjenigen des gewöhnlichen und haben daher dieselbe Gestalt.

Zu allem Überfluss muss Mikloweit seine Papiere farbig bedrucken – bei einfarbigem Papier wären die Laschen, mit denen ein Bauteil an seine Nachbarn zu kleben ist, von der falschen Farbe gewesen –, und zwar beidseitig (es gibt keine unsichtbaren Rückseiten) und passgenau: eine Aufgabe, die selbst hochwertige Farbdrucker an den Rand ihrer Möglichkeiten bringt. Aber die zahlreichen Fehldrucke sind nicht das größte Problem des Produktionsprozesses; das präzise Ausschneiden der Spitzenmuster erfordert viel Geduld und die schiere Anzahl der Teile eine sorgfältige Buchhaltung.

Durchbrochene Polyeder: Eine Lebensaufgabe

Kompliziertere Polyeder (Bild S. 83 oben) wollen Schicht für Schicht von innen nach außen gebaut werden; und man braucht nicht nur die – relativ einfache – Gestalt einer Fläche, sondern die aller Teilflächen, die dadurch entstehen, dass andere Flächen sie durchschneiden. Dadurch kommen im Extremfall mehrere tausend Einzelteile zusammen. Die dafür erforderlichen Berechnungen hätte Mikloweit nicht bewältigen können, wenn nicht zum rechten Zeitpunkt Robert Webb, im Hauptberuf Softwareentwickler in Melbourne (Australien), sein umfangreiches Programmpaket »Stella« zur Darstellung und Berechnung von Polyedern ins Netz gestellt hätte.

Selbst ein so systematischer Mensch wie Ulrich Mikloweit begnügt sich nicht damit, die Nummern aus »Polyhedron Models« eine nach der anderen abzuarbeiten. Schon Wenninger hat sich diesen oder jenen Abstecher genehmigt, und Gelegenheiten dazu gibt es viele.

So bieten die dualen Körper zu den uniformen Polyedern allerlei Reizvolles. Entsprechend dem Dualitätsprinzip sind bei ihnen alle Flächen gleich, aber die Ecken im Allgemeinen von verschiedener Art; und wenn sich Flächen im Original durchdringen, dann gilt das auch für ihre dualen Gegenstücke. Es gibt drei verschiedene dual-uniforme Polyeder, die aus genau 30 Rauten bestehen (»Rhombentriakontaeder«); aber nur eines von ihnen ist frei von Selbstdurchdringungen (Bild links).

Es stellt sich heraus, dass bei diesen und anderen Rautenkörpern stets zwei Rauten in gleicher Orientierung einander gegenüberliegen. Also kann man entsprechende Kanten dieser beiden Rauten durch Rechtecke verbinden und dann die ursprünglichen Rauten weglassen. Dadurch grenzen an jede Kante des ursprünglichen Polyeders zwei Flächen, nämlich die Rechtecke zu den Rauten, die zuvor die Kante berandeten, und man hat ein neues, sehr tief verschachteltes Polyeder – allerdings kein uniformes, denn die Rechtecke sind im Allgemeinen keine Quadrate.

Über dieses Beispiel hinaus gilt: Die Menge der Kanten legt ein Polyeder noch nicht fest. Immer wieder finden sich Körper, deren Kanten man auch in völlig anderer Weise zu Flächen zusammenstellen kann (Bild links unten).

Ein weiteres Betätigungsfeld eröffnet sich in Gestalt der gleichflächig-gleicheckigen Polyeder. Man fordert zwar, dass alle Flächen und alle Ecken untereinander gleich sein sollen; aber die Flächen selbst müssen in diesem Fall keine Regelmäßigkeit aufweisen. Max Brückner (1860–1934), Gymnasiallehrer in Bautzen und vor allem bekannt durch sein umfassendes Werk »Vielecke und Vielfläche« (1900), hat in einer ebenfalls sehr umfangreichen Abhandlung alle Polyeder dieser Art vollständig zu klassifizieren versucht – und etliche übersehen, die Ulrich Mikloweit inzwischen kennt und gebaut hat.

Diese und andere Abstecher haben das große Programm etwas verzögert. Aber wenn Ulrich Mikloweit 2018 in Rente geht, wird er mehr Zeit haben. Dann müsste der Rest von Wenningers Sortiment in zehn Jahren zu schaffen sein. ◀

QUELLEN

Brückner, M.: Über die gleichseitig-gleichflächigen, diskontinuierlichen und nichtkonvexen Polyeder. In: Nova Acta. Abhandlungen der Kaiserl. Leop.-Carol. Deutschen Akademie der Naturforscher LXXXVI, Nr. 1, S. 1–345, 1906

Wenninger, M.: Polyhedron Models. Cambridge University Press, New York 1971

WEBLINKS

www.polyedergarten.de/

Ulrich Mikloweits Website, mit Abbildungen der meisten seiner Werke und einer umfangreichen Linkliste

www.software3d.com/Stella.php

Stella: Polyhedron Navigator, von Robert Webb

ALICE JONES/BBC/POLYBAND, AUS S. COOTER UND M. DYAS: KRÄFTE DER NATUR, MIT FRDL. GEN. VON POLYBAND, MÜNCHEN



Im spanischen Vilafranca del Penedès präsentieren verschiedene Vereine die Kunst, Menschenpyramiden oder -türme zu bauen. Diese »Castells« können bis zu zehn Etagen haben.



Stephen Cooter, Matthew Dyas
KRÄFTE DER NATUR
Fantastische Phänomene
Dokumentation,
Großbritannien 2017
Laufzeit 200 Minuten
polyband, München 2017
DVD € 14,99, Blu-ray € 16,99

FILMKUNST NATURGEWALTEN IN SCHÖNEN AUFNAHMEN

**Die Dokumentation
»Kräfte der Natur«
setzt atemberaubende
Naturphänomene in
Szene.**

Die vorliegende BBC-Dokumentation geht spektakulären Erscheinungen auf unserer Erde nach – und den Kräften, die dahinter stehen. Als Mini-

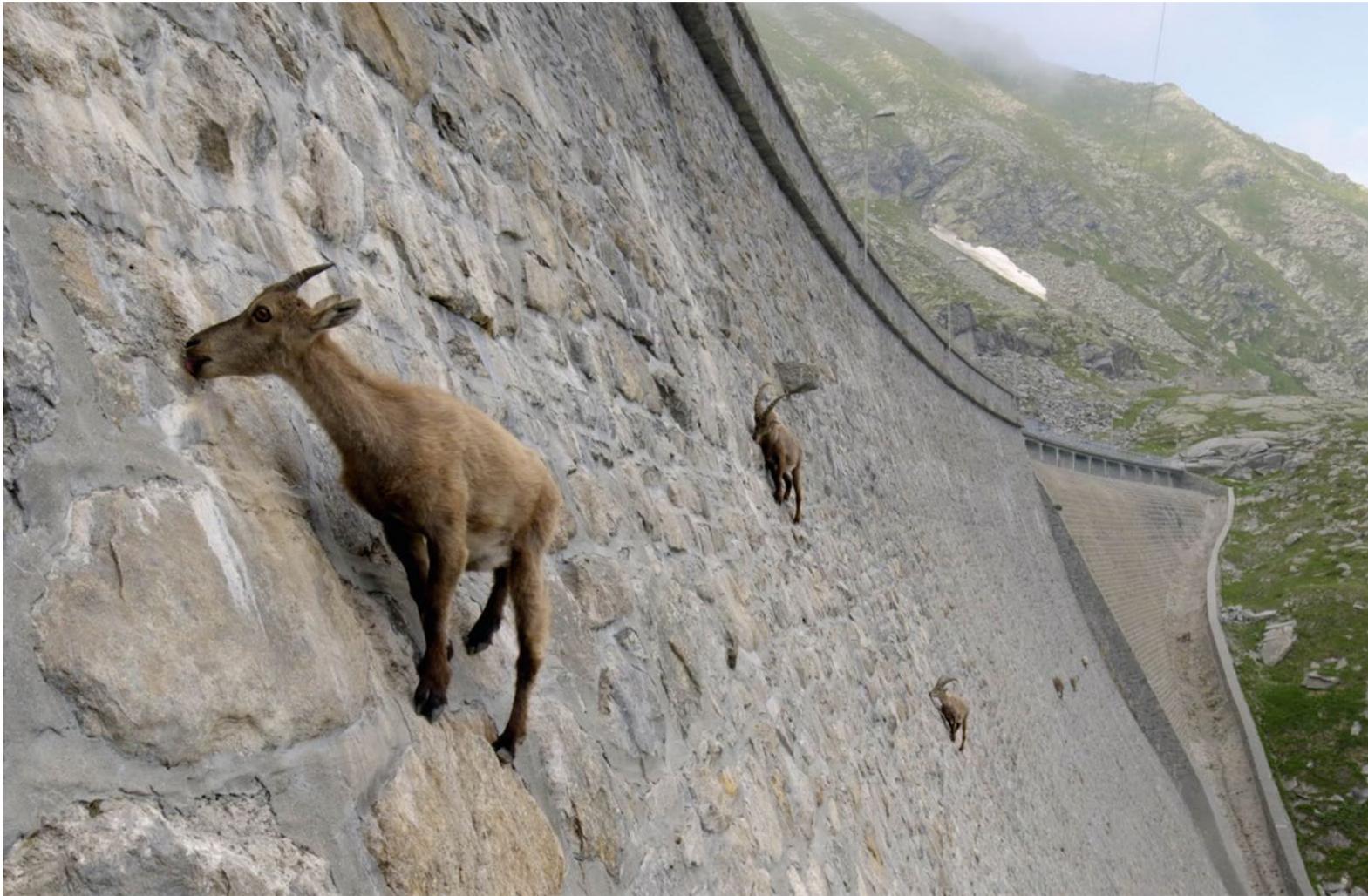
serie zur ZDF-Terra-X-Sendung »Fantastische Phänomene« unterteilt sie sich in die vier Episoden »Form«, »Bewegung«, »Elemente« und »Farben«. Diese beschäftigen sich mit natürlichen Formen und Phänomenen, von denen das irdische Leben geprägt wurde und wird.

Stephen Cooter und Matthew Dyas (Regie) behandeln Fragen, die in die Domäne der Naturwissenschaft fallen – etwa wieso Wasser blau erscheint, weshalb Honig-

bienen ihre Waben sechseckig bauen, welche Kraft natürliche Formen wie die der Eisberge hervorbringt, wie Licht entsteht und warum das Grün der Pflanzen für uns lebenswichtig ist. Mit Hilfe modernster Filmtechnik geben die Filmemacher Antworten darauf. Das fällt inhaltlich zwar recht knapp, dafür aber umso üppiger bebildert aus.

Manche Geschichten, beispielsweise zu den Haloklinen (Übergangszonen zwischen Wasser-

BBC/POLYBAND, AUS S. COOTER UND M. DYAS: KRÄFTE DER NATUR; MIT FRDL. GEN. VON POLYBAND, MÜNCHEN



Alpensteinböcke erklimmen die Cingino-Staumauer im Piemont, Italien. Sie lecken Salz von den Steinen, das sich dort absetzt, wenn mineralhaltiges Wasser durch die Mauer sickert.

schichten unterschiedlichen Salzgehalts), wirken wie zusammengewürfelt. Die gezeigten Filmaufnahmen aus unterschied-

lich vermitteln. Ganz besonders begeistern die Aufnahmen der Menschentürme oder -pyramiden im spanischen Vilafranca

Die Kreisform bietet ein stabiles Fundament auch für Menschentürme

lichsten Ländern sind allerdings wahrhaft atemberaubend und prägen den Eindruck stärker als die Sachinformationen, da sie die fantastische Schönheit des Planeten sehr anschau-

del Penedès (Episode »Form«). In dieser katalanischen Gemeinde finden immer wieder Wettbewerbe statt, in denen spanische Vereine gegeneinander antreten, um den höchsten

Menschenturm zu errichten und so kurzzeitig die Erdanziehung zu »überwinden«. Die Kreisform eignet sich als Basis hierfür besonders gut, da sie eine hohe Stabilität vermittelt.

Für Begeisterung sorgen auch die Aufnahmen kletternder Alpensteinböcke im italienischen Piemont (Episode »Elemente«). Wagemutig klimmen die Tiere eine 50 Meter hohe Staumauer empor, um an bestimmte Mineralien zu gelangen. Die Salze sind in dem Wasser gelöst, das der Damm zu-

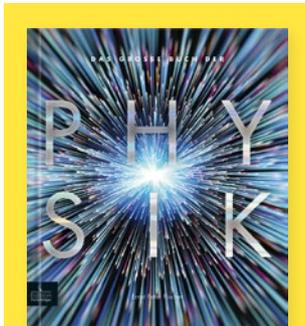
rückhält, sickern zusammen mit diesem durch das Mauerwerk und setzen sich außen auf den Steinen ab. Unglaublicherweise schaffen es die Alpensteinböcke, das Bauwerk zu erklettern und das Salz von der Staumauer zu lecken.

Das Fazit der Dokumentation: Unsere Erde ist voller Wunder – und je besser wir diese verstehen, umso mehr werden wir über sie staunen.

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

PHYSIK GELUNGENE RUNDUMSCHAU

Von allgemeine Relativitätstheorie bis Z-Boson und quer durch die Zeiten behandelt dieser Band die ganze Physik.



Ernst Peter Fischer
**DAS GROSSE BUCH
DER PHYSIK**
Fackelträger, Köln 2017
320 S., € 40,-

Wissenschaftshistoriker Ernst Peter Fischer hat ein »großes« Buch der Physik vorgelegt, das schon von Umfang und Aufmachung her diese Bezeichnung verdient. Auch inhaltlich erweist es sich als ziemlich umfassend.

Fischer beschreibt die Physik als eine Naturwissenschaft mit Sonderstellung, die tiefe Einsichten in die Natur ermöglicht. Im 17. Jahrhundert beginnt sie sich mit Galileo Galilei und später Isaac Newton neben der Philosophie zu etablieren – und wird im 20. Jahrhundert zu jener Disziplin, welche die Philosophie vorantreibt und ihr Antworten abverlangt. Bald spaltet sich die Physik in einen experimentellen und einen theoretischen Teil; diese beiden sind aber immer ein Ganzes und können nur

zusammen existieren. Fischer knüpft hier an die »Kritik der reinen Vernunft« von Immanuel Kant an, die Physiker wie Max Planck und Albert Einstein stark beeinflusst hat.

Der Autor stellt zehn grundlegende Begriffe der Physik in der Reihenfolge ihrer Bedeutung vor, wobei er viele historische Fakten einbezieht. An vorderster Stelle steht die »Energie«, untersucht und definiert von Aristoteles, Leonardo da Vinci, Rudolf Clausius, James Joule, James Watt, Emmy Noether und natürlich Planck und Einstein.

Weitere Abschnitte sind dem Atom, der Materie, dem Feld, der Raumzeit und den Quanten gewidmet; abschließend werden noch die Elementarteilchen, das heutige Standardmodell der Elementarteilchenphysik und das Prinzip der Komplementarität erörtert. Fischer, zu dessen bevorzugten Themen die Quantenmechanik gehört, spart nicht mit Bezügen zur tagtäglichen Welt. So führt er uns den gewaltigen Irrtum von Politologen und Wirtschaftsexperten vor, die im Hinblick auf bedeutende Veränderungen gern von »Quantensprüngen« reden – nicht wissend, dass Quantensprünge in der Physik die allerkleinsten energetischen Veränderungen sind.

In Bezug auf die Materie ist Fischers Beschreibung des menschlichen Gehirns mit der ihm innewohnenden Vernunft interessant. Dieses Organ erreicht den Höchstgrad an Komplexität innerhalb des Universums, soweit uns bekannt. Die Materie versucht sich hier quasi selbst zu finden und zu verstehen.

Ein weiteres Kapitel behandelt Disziplinen, in die wir heute die Physik unterteilen: klassische Mechanik, klassische Elektrodynamik, Thermodynamik, Relativitätstheorie und Quantenphysik. Und wieder stellt Fischer die einschlägigen Entdeckungen in den jeweiligen historischen Kontext. Hier findet sich so ziemlich alles, was in der Physik Rang und Namen

Schriftsteller Raymond Chandler schmeichelt den Physikern: »Ohne Wissenschaft wäre die Kunst ein wüstes Durcheinander aus Folklore und emotionaler Scharlatanerie.«

Das Werk ist ausgiebig bebildert, wobei viele Fotos und grafische Darstellungen leider nicht in die Beschreibungen einbezogen sind und nur der Ästhetik dienen. Das sind immerhin

Im Gehirn versucht sich die Materie quasi selbst zu finden und zu verstehen

hatte – beginnend bei Aristoteles, Galilei und Newton bis hin zu Einstein, Planck, Bohr, Feynmann und Heisenberg.

Dem heutigen Stand der Physik ist das vierte Kapitel »Mosaik der Moderne« gewidmet. Wer denkt, dass er jetzt mit dem Lesen aufhören kann, weil er sowieso nichts mehr versteht, irrt. Fischer stellt in elf Fachdisziplinen die aktuellen Forschungsrichtungen und -ergebnisse so dar, dass man sie nachvollziehen und in das eigene Weltbild einordnen kann. Geophysiker beispielsweise untersuchen, welche gewaltige Energie in der Erde gespeichert ist und ständig von der Sonne empfangen wird. Es ist beeindruckend zu erfahren, wie sich die Kontinentalmassen verschoben haben und immer noch verschieben, und dass wir Menschen seit zirka 11 000 Jahren in einer Warmzeit leben.

Das Buch schließt mit dem Kapitel »Physik und Poesie« ab, in dem es von da Vinci über Goethe und Shakespeare bis zu Heisenberg und Einstein geht. Der

67 ganzseitige Darstellungen. Schade, dass die interessanten Gebiete Radioaktivität und Kernphysik/Kerntechnik mit den renommierten Physikern Antoine-Henri Becquerel, Otto Hahn, Enrico Fermi und den Curies keine Rolle spielen.

Fischer gibt rund 650 Schlagworte an, so dass ein leichtes Navigieren möglich ist. Wer sich weiterführend informieren möchte, kann die gut zitierte Originalliteratur oder eines der anderen 24 Bücher des Autors einsehen. Ungewöhnlich ist der weiße Druck auf schwarzem Hintergrund. Grafisch sicher eine exzellente Lösung, aber Bemerkungen können nicht mehr an den Rand geschrieben werden.

Das »Große Buch der Physik« eignet sich für alle, die Freude am Erkennen der uns umgebenden Welt haben und das Denken nicht scheuen. Und das fast ohne Formeln.

Klaus Konschak ist Physiker, Strahlenschutzberater und arbeitete viele Jahre als Leiter des Zittauer Lehr- und Forschungsreaktors.

ETHNOLOGIE VON KAMTSCHATKA BIS HAWAII

Objekte aus der Ethnologischen Sammlung der Universität Göttingen bezeugen die Erkundung des nördlichen Pazifiks.

► Kapitän James Cook (1728–1779) starb am 14. Februar 1779 auf Hawaii bei dem Versuch, den dortigen König als Geisel zu nehmen, nachdem es zu mehreren Diebstählen an der Ausrüstung der Expeditionsschiffe »Resolution« und »Discovery« gekommen war. Der Vorfall wurde historisch, literarisch und künstlerisch



Gudrun Bucher
DIE ENTDECKUNG DES NORDPAZIFIKS
Eine Geschichte in 44 Objekten
Philipp von Zabern,
Darmstadt 2017
256 S., € 39,95

aufgearbeitet. So zeigt ein bekanntes Gemälde des britisch-deutschen Malers Johann Joseph Zoffany (1733–1810), wie der am Boden liegende Cook von seinem Mörder erschlagen

wird. Dabei fällt dessen roter Federhelm auf, ein Erkennungszeichen hochgestellter hawaiianischer Persönlichkeiten. Solche Helme bestanden aus einem Pflanzenfasergeflecht mit gelbem Kamm und sollten göttliche oder mystische Kräfte verleihen, die von Priestern oder Herrschern übertragen worden waren.

Ein entsprechendes Exemplar findet sich in der Ethnologischen Sammlung der Universität Göttingen. Ihre Basis liegt im Erwerb zweier Teilkollektionen: Zum einen der Cook-Forster-Sammlung, also Exponaten, die Cook und sein Reisebegleiter Johann Georg Forster (1754–1794) während Cooks zweiter

Fahrt zusammengetragen haben. Hinzu kam die Sammlung des russischen Barons Georg Thomas von Asch (1729–1807) mit Exponaten aus Sibirien und Russisch-Amerika (Alaska). Damit ist eine äußerst breite kulturelle Vielfalt abgedeckt.

Anhand des Federhelms und 43 weiterer Objekte der Göttinger Sammlung schildert die Ethnologin Gudrun Bucher in diesem Band die europäisch-russische Entdeckungsgeschichte des nordpazifischen Raums. Dabei zeigt sie viele Querverbindungen zwischen den Kulturen und Objekten der Sammlung auf, obwohl diese auf den ersten Blick isoliert erscheinen. So waren die meisten

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](https://www.spektrum.de/schreibwerkstatt)

REZENSIONEN

Expeditionen in den nordpazifischen Raum internationale Unternehmungen, an denen Wissenschaftler, Matrosen und Künstler diverser Herkunft teilnahmen. Manche waren bei mehreren Fahrten dabei, jeweils in unterschiedlichem Auftrag. Der englische Hydrograf Joseph Billings (1758–1806) beispielsweise war zunächst bei der dritten Reise Cooks mit an Bord und segelte später im Auftrag der Zarin Katharina II. (1729–1796). Der Amerikaner John Ledyard (1751–1789) war zunächst ebenfalls unter Cook gesegelt, zog später allein von Petersburg nach Jakutsk und schloss sich Billings an.

Die Anoraks der Indigenen waren aus Seelöwendarm – und besser als die Jacken der westlichen Schiffsbesatzung

Von diesen und anderen Personen stammen sehr genaue Schilderungen der Landschaften, Küsten und Völker im Nordpazifik. So führte die von Vitus Bering (1681–1741) ab 1733 geleitete zweite Kamtschatka-Expedition zur ersten ausführlichen Beschreibung der Tungusen. Der Begriff diente im 18. Jahrhundert als Sammelbezeichnung für eine Vielzahl nomadischer Völker im Osten Sibiriens. In der »Beschreibung der sibirischen Völker« des Historikers Gerhard Friedrich Müller (1705–1783) findet sich unter anderem die detaillierte Schilderung tungusischer Kleidung. Die Autorin verdeutlicht den Text anhand eines ebenfalls in der Göttinger Ethnolo-

gischen Sammlung befindlichen, gut erhaltenen tungusischen Festtagsgewands aus Leder, Stoff und Tierhaaren.

Ein anderes Objekt der Sammlung, das die Autorin vorstellt, ist ein Anorak aus zusammengenähten Seelöwendärmen. Die Bewohner der Aleuten produzierten solche Kleidungsstücke, und Cook stellte fest, dass sie das Wasser besser abhielten als die Jacken seiner eigenen Leute. Immer wieder erzählt Bucher faszinierende Geschichten von ethnografischen und kolonialpolitischen Entdeckungen, wenn sie die Artefakte der Göttinger Kollektion beschreibt – sei es eine Maske des

hawaiianischen Kriegsgottes Ku oder eine Harpunnenspitze aus Knochen; seien es Muscheln von Vancouver Island, ein Schamanenmesser (oder Ritualstab) von den Aleuten, ein tschuktschischer Lamellenpanzer, eine Kampfkeule aus Alaska oder eine ebenfalls von dort stammende bemalte Holzmaske. Dadurch gelingt es ihr, die ansonsten eher weniger bekannte Entdeckungsgeschichte des Nordpazifiks anschaulich und spannend darzustellen. Das Buch richtet sich an ethnologisch und kulturgeschichtlich interessierte Leserinnen und Leser.

Martin Schneider ist Wissenschaftshistoriker und Dozent in der Erwachsenenbildung.

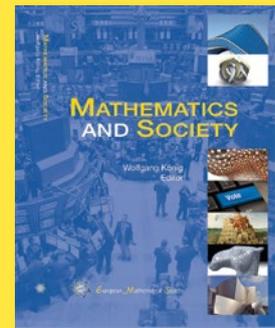
MATHEMATIK FINANZEN, KRYPTO- GRAFIE UND WETTER

Mathematik hat eine hohe gesellschaftliche Relevanz. Leider bleibt das oft unbemerkt.

► Unser ganzes Leben ist von Mathematik durchdrungen – und keiner merkt es. Das GPS-Handy weiß jederzeit genau, wo ich bin; Amazon schlägt mir Waren zum Kauf vor, für die ich durchaus Interesse aufbringe; meine Bank kommt irgendwie zu der Einschätzung, ich sei kreditwürdig; und die Wettervorhersage ist um Klassen besser als noch vor wenigen Jahrzehnten. Und das alles, ohne dass ich mit einer Definition, einem Beweis oder auch nur einer klitzekleinen Differenzialgleichung behelligt würde.

Professionelle Mathematiker haben allen Anlass, diesen Zustand zu beklagen, weil ihnen dadurch der verdiente Ruhm entgeht. Aber nicht nur sie: Auch dem Normalmenschen bleibt verborgen, welche nützlichen Dinge die Mathematik für ihn tut, und zwar ohne dass er das irgendwie kontrollieren könnte.

Also machten sich Vertreter des Fachs auf, diesem beklagenswerten Zustand abzuhelfen. Der 7. Europäische Mathematikerkongress, der im vergangenen Jahr in Berlin stattfand, bot ihnen dafür einen willkommenen Anlass. Der vorliegende Band wurde jedem



Wolfgang König (Hg.):
MATHEMATICS AND SOCIETY
European Mathematical Society,
Zürich 2016
302 S., € 42,-

Teilnehmer zusammen mit den Unterlagen ausgehändigt und besteht aus einer thematisch wie formal sehr bunten Mischung von 15 Beiträgen. Sie decken tatsächlich ein weites Feld gesellschaftlich relevanter Anwendungen von Mathematik ab.

Helmut Neunzert, Gründer und langjähriger Chef des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) in Kaiserslautern, beschreibt an mehreren Beispielen aus seinem reichhaltigen Erfahrungsschatz, wie sehr sich die Tätigkeit eines Industriemathematikers von der seiner akademischen Kollegen unterscheidet. Man studiert nicht eine Methode und sucht Probleme, auf die man sie anwenden kann, sondern eben umgekehrt. Und ganz wichtig: Man liefere dem Auftraggeber nicht einfach eine fertige Lösung des Problems, sondern lasse ihm wenigstens einen Knopf, an dem er selbst drehen kann. Sonst packt ihn die Angst vor dem Kontrollverlust.

Christiane Rousseau von der Université de Montréal,

bekannt geworden als treibende Kraft hinter der Aktion »Mathematics of Planet Earth« (2013), ist sogar so uneigennützig, gar nichts von ihrer eigenen Arbeit zu erzählen. Vielmehr gibt sie eine Einführung in »Geometrien der Natur«, unter denen die fraktale nur die prominenteste ist.

Haben die Mathematiker die Finanzkrise von 2008 auf dem Gewissen? Nein, argumentiert Walter Sacher Mayer von der Universität Wien. Mathematiker haben zwar die Werkzeuge zur Berechnung finanzieller Risiken bereitgestellt, insbesondere die berühmt gewordene Formel von Black und Scholes; aber es waren die Finanzleute, die sie gegen die Warnungen

der Mathematiker falsch angewendet haben.

Weitere Gebiete, zu denen die Mathematik Wesentliches beizutragen hat, werden ebenfalls gründlich besprochen, darunter demokratische Abstimmungssysteme, sichere Nachrichtenübermittlung durch Verschlüsselung sowie Wetter- und Klimaprognosen.

Gegen die Qualität der Beiträge ist nichts einzuwenden, im Gegenteil. Dennoch weckt das Gesamtwerk sehr gemischte Gefühle. Es versucht beide Zielgruppen, Professionelle wie Laien, gleichermaßen zu bedienen, und dieser Spagat kann nicht gelingen. Das fängt bei der Sprache an. Die überwiegende Mehrheit der Autoren ist

deutscher Muttersprache, und etliche von ihnen hatten erkennbar mit dem Englischen zu kämpfen. Ihre Inhalte wären auf

unbekömmlich ist. Zudem haben die Veranstalter gar nicht erst versucht, das Werk über den gewöhnlichen Buchhandel zu ver-

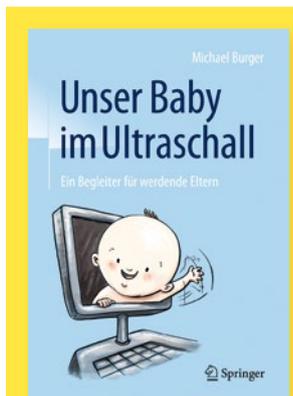
Die Mathematiker haben zwar die Werkzeuge bereitgestellt, aber die Finanzleute wendeten sie falsch an

Deutsch wahrscheinlich eindrucksvoller herübergekommen; aber das kann man den Kollegen auf einem internationalen Kongress natürlich nicht zumuten.

Zwar enthalten die Artikel beileibe kein Übermaß an Formeln. Aber viele von ihnen folgen der fachüblichen Darstellungsform, die für Nichtmathematiker eher

breiten; erhältlich ist es nur über die Website der European Mathematical Society (www.ems-ph.org). Den mathematisch interessierten Laien sei immerhin gesagt: Ja, es ist mühsam, sich durch dieses Buch zu arbeiten und es zu verstehen. Aber die Anstrengung lohnt sich durchaus.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Michael Burger
UNSER BABY IM ULTRASCHALL

Ein Begleiter für werdende Eltern

Springer, Berlin 2017
170 S., € 19,99

MEDIZIN EINBLICK IN DEN MUTTERLEIB

Wie Ultraschallwellen zur vorgeburtlichen Diagnostik beitragen.

Regelmäßige Ultraschallkontrollen gehören selbstverständlich zur Schwangerschaftsvorsorge. Doch die Untersuchungsmethode wirft bei vielen werdenden Eltern Fragen auf: Was bedeuten die schwarzen und weißen Flächen auf dem Bild? Kann das Ungeborene den Ultraschall spüren? Und wie funktioniert die Technik? Der österreichische Mediziner Michael Burger hat sich auf Pränataldiagnostik spezialisiert. In seinem Buch erklärt er humorvoll und informativ die physikalischen Grundlagen, technischen Möglichkeiten und praktischen Anwendungen der Ultraschallmethode.

Zu jedem Schwangerschaftsdrittel beschreibt Burger, was die Ärzte bei Kontrollterminen untersuchen, was man zu dem Zeitpunkt bereits erkennen kann und welche zusätzlichen diagnostischen Möglichkeiten es gibt. Dabei geht er zwar auch auf medizinisch relevante Auffälligkeiten ein, legt den Fokus aber auf die gesunde Entwicklung des Kindes. Statistische Wahrscheinlichkeiten ordnet er verständlich ein und macht deutlich, dass nicht jeder potenziell kritische Befund tatsächlich bedrohlich ist. Viele vermeintliche Komplikationen verschwinden von selbst. Beispielsweise liegt die Plazenta in der Mitte der Schwangerschaft noch bei

12 von 200 Schwangeren vor dem Muttermund (Placenta praevia), zum Zeitpunkt der Geburt hat aber nur noch eine von ihnen dieses Problem.

Medizinische Fachbegriffe erklärt der Autor im Fließtext und führt sie außerdem in einem Glossar am Ende des Buchs auf. Das erleichtert medizinischen Laien, das ärztliche Vokabular zu verstehen. Da das Buch sehr übersichtlich gestaltet ist, eignet es sich gut, um nach dem ersten Lesen immer wieder einzelne Aspekte nachzuschlagen. So überzeugt es als hilfreicher Begleiter für die Schwangerschaft. Elena Bernard

Spektrum gibt es auch digital.



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

Bestellen Sie jetzt Ihr Digitalabo!

service@spektrum.de

www.spektrum.de/digitalabo



1917



Ein seltsamer Sitzplatz.

NISTEN UNTER BESCHUSS

»Wie auffallend bereits sich die Vogelwelt an die durch den jahrelangen Krieg geschaffenen ungewohnten Verhältnisse angepaßt hat, zeigt unser Bildchen. Ohne Rücksicht auf das tägliche Artilleriefeuer einer in allernächster Nähe eingegrabenen deutschen Batterie in den

kurländischen Sanddünen hat die sorgende Vogelmutter ihre Kinderstube in einer abgeschossenen Kiefer eingerichtet, und wenn man aus dem munteren neugierigen Blick, mit dem seine Insassen sich die eigenartige Umgebung zu betrachten scheinen, auf ihr Befinden schließen darf, so scheinen sich diese »Kriegskinder« in ihrer immerhin ungewöhnlichen Lage recht wohlfühlen.«

Kosmos 10, S. 276

WITTERUNG UND ARBEITSLUST

»Eines der bemerkenswerten Ergebnisse [einer eingehenden Untersuchung über den Einfluß der Witterung auf die menschliche Arbeitsfähigkeit] ist, daß erhebliche, plötzlich einsetzende Temperatur- und Luftdruckschwankungen sowie Sturmperioden mit nachfolgender kälterer Witterung auf die Arbeitslust anregend wirken. Die günstigste Temperatur für geistige Arbeit liegt bei 13° C, während die körperliche Leistungsfähigkeit bei Männern mit 15, bei Frauen mit 16° C ihren Höhepunkt erreicht. Geht die Temperatur über diese Grenzpunkte hinaus, so ist eine Verringerung der Arbeitslust die Folge; bei höheren Temperaturen wird diese Verringerung sehr merklich.«

Kosmos 10, S. 269

SCHWEBEND ÜBER TIROL

»Die Wunder der Technik sind für alle Welt zerstreut, und wenn auch leider manche nicht zur Verschönerung der Landschaft beitragen, so fügen doch andere sich ganz gut in ihren Rahmen ein. Das gilt z. B. von der bei Meran erbauten Schwebebahn nach dem Vigiljoch, die eine wunderschöne Aussicht bietet. Die kleinen Schwebewagen gestatten sogar einen Aufenthalt auf dem Dache während der Fahrt. Der untere Bahnhof liegt 318 m, der obere 1468 m hoch, die Länge der Bahn beträgt 2200 m.«

Technische Monatshefte 10, S. 319

1967



Hochleistungs-Kopierbohrmaschine zur Herstellung gedruckter Schaltungen.

PLATINEN-PRODUKTION

»Eine Hochleistungs-Kopierbohrmaschine erlaubt ein schnelles und genaues Bohren von Leiterplatten, ohne daß vorher teure Bohr- und Stanzwerkzeuge herangezogen werden müssen. Herzstück dieser Maschine ist

eine hochtourige Bohrmaschine, die über Storchschnabel-Übersetzung mit einer Tastnadel verbunden ist. Die Tastnadel wird von Hand auf die Oberfläche der Bohrschablone auf vorgezeichnetem Wege von Loch zu Loch geführt. Die hohe Tourenzahl der Bohrmaschine erlaubt einen großen Vorschub des Bohrtisches, so daß die Arbeitszeit je Loch im Schnitt unter 0,5 sec liegt.«

Automatik 10, S. 380

FÜRSORGLICHE GOCKEL

»Ein mütterliches Verhalten kann beim Haushahn mit Hilfe von Alkohol induziert werden. Die Versuchstiere, die Alkohol (9 ml/kg Körpergewicht von 33% Getreidealkohol) oral erhielten, wurden in Kontakt mit frisch ausgebrüteten Hühnchen gebracht. Sämtliche der alkoholbehandelten Hähne beschützten die Hühnchen während der ersten Nacht. Drei der Hähne entwickelten zusätzlich Züge von mütterlichem Verhalten, und die Hühnchen folgten ihnen ständig. Die Kontrolltiere hingegen vermieden die Hühnchen und zeigten ein aggressives Verhalten. Möglicherweise wird durch Alkohol das aggressive Verhalten [der Hähne] unterdrückt.«

Naturwissenschaftliche Rundschau 10, S. 441

WOHNBOOT

»Wohnwagen gehören schon zum normalen Bild auf den Strassen und Campingplätzen. Nun hat eine Firma ein Fahrzeug entwickelt, das als Schwimmcaravan bezeichnet wird und eine aus glasfaserverstärktem Polyester bestehende Karosserie hat, die nahtlos in einem Stück geformt wurde. Der serienmässig gebaute Wohnwagen kann als Wohnboot benutzt werden, ist kentersicher und unsinkbar.«

Neuheiten und Erfindungen 373, S. 184

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.

RELATIVITÄT UND SONOGRAFIE

Florian Freistetter legte dar, wie stark Christian Dopplers Formel unsere Zivilisation heute durchdrungen hat (»Gestauchte und gedehnte Wellen«, Freistetters Formelwelt, *Spektrum* August 2017, S. 57).

Dieter Föller, Seeheim-Jugenheim: Freistetters Formel $\lambda / \lambda_0 = \sqrt{(c+v)} / \sqrt{(c-v)}$ beschreibt nicht den Doppler-Effekt, wie wir ihn als das »liiiuuu« vorbeifahrender Autos erleben. Diese Formel ist nur für elektromagnetische Wellen gültig und enthält den so genannten Lorentz-Faktor. Dieser berücksichtigt relativistische Effekte bei den Geschwindigkeiten, wie sie in der Astronomie auftreten. Bei irdischen Geschwindigkeiten spielen solche Effekte keine Rolle, womit sich die Formel zu $\lambda / \lambda_0 = c / (c - v)$ ergibt.

Der akustische Doppler-Effekt, den wir alle täglich wie erwähnt erleben oder eventuell im Rahmen einer angiologischen Doppler-Sonografie beobachten können, betrifft Schallwellen in der uns umgebenden Luft beziehungsweise Ultraschall in unserem Blut. Hier überlagert sich die Fahrgeschwindigkeit v_S eines Autos (S für Sender) beziehungsweise die Fließgeschwindigkeit v_M des Bluts (M für Medium) mit der Schallgeschwindigkeit c_M im Körper.

Die beiden ursprünglichen und in der Akustik für Schallwellen weiter gültigen Doppler-Formeln unterscheiden, ob der Beobachter B oder der Sender S ruht. Sie lassen sich für die vom Beobachter gehörte Frequenz (Tonhöhe) zusammenfassen zu $f_B = f_S (c_M + v_B) / (c_M - v_S)$. Hier sind vereinbarungsgemäß v_S und v_B positiv, wenn sich S und B aufeinander zu- (hoher Ton), und negativ, wenn sie sich voneinander wegbewegen (tiefer Ton).

Bei der Sonografie ruhen S und B beide im Schallkopf, und B empfängt im Idealfall drei von den lokalen Teilchen im Körper gestreute Ultraschallwellen: Die von den ruhenden Körperteilchen hat die Frequenz f_S , die zwei von den im Blut fließenden haben f_1 beziehungsweise f_2 . So findet man etwa für $f_1 = f_S (c_M + v_M) / (c_M - v_M) > f_S$ und analog mit getauschten Vorzeichen $f_2 < f_S$. Im Ultraschallbild erscheinen dann die zum Schallkopf hin- beziehungsweise von ihm wegströmenden Bereiche vom Computer farblich kodiert dargestellt, und zwar zum Schallkopf hin (f_1) rot und von ihm weg (f_2) blau.

FRAGE NACH LEBEN NICHT ÜBERBEWERTEN

Der Molekularbiologe Patrick Forterre untersuchte, inwiefern es sich bei Viren um lebende Organismen handelt (»Die wahre Natur der Viren«, *Spektrum* August 2017, S. 34).

Dietrich H. Nies, Halle (Saale): Nun mal langsam. Immer wieder diese unsinnige Diskussion, ob Viren leben. Können sie nur dann wichtig, verbreitet oder interessant sein? Solide wissenschaftliche Hypothesenbildung hat die Grundforderungen von erstens Falsifizierbarkeit, zweitens »Ockhams Rasiermesser« und drittens dem Aufbau auf grundlegenden Erkenntnissen. Grundlegende Erkenntnisse sind die drei Hauptsätze der Thermodynamik. Der Lebensprozess wurde auf dieser Grundlage beispielsweise von Erwin Schrödinger in »What is Life?« definiert: Energietransformation abgegrenzter Systeme, wobei die interne Ordnung (Negentropie) erhöht wird und dies durch stärkere Entropieabsenkung außen überkompensiert wird. Ganz einfach.

Viren können keine eigenständige Energietransformation durchführen und damit leben sie nicht, wie seit 60 Jahren glasklar ist, egal, wie viel Gene ein Virion trägt und wie verbreitet und wichtig Viren sind. Der Autor weiß dies natürlich und flanscht mal eben eine Hilfhypothese an: Die virusinfizierte Zelle lebt! Dies wird als »Viruszelle« flugs neu definiert und somit »Virus« über die Viruszelle als lebendig erklärt unter Akzeptanz der Tatsache, dass ein Virion nicht lebt. Dieser Brechstangen-Argumentation kann ich nicht folgen.

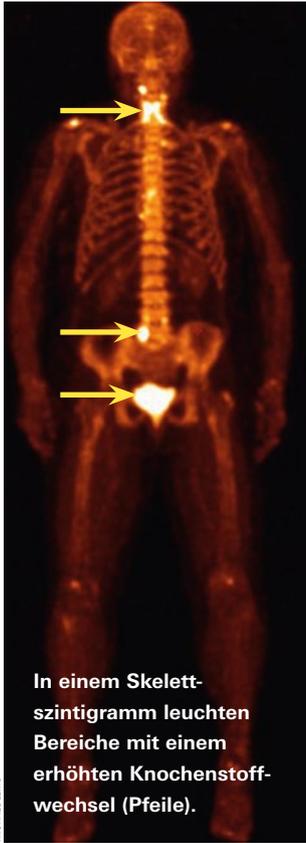
Viren sind tolle, hochinteressante Systeme, haben vermutlich wirklich zur Entstehung des Zellkerns beigetragen (neue Phagenliteratur wurde im Artikel gar nicht erst zitiert), sind weit verbreitet, vielleicht ist die ukrainische Phagentherapie wirklich hilfreich, alles prima, aber warum müssen die Dinger nun unbedingt leben? Dann leben Plasmide, genomische Inseln, konjugative Transposons auch.

Ernst Sauerwein, München: Man sollte die Frage, ob Viren leben, nicht überbewerten. Ich persönlich würde bei der bisherigen Sprachregelung bleiben.

Wir müssen uns aber im Klaren sein, dass das Leben nicht auf einen Schlag begonnen hat, sondern in einem Prozess. Und an diesem Prozess waren Viren maßgeblich beteiligt.

Vielleicht nimmt, wenn man an die Anfänge zurückgeht, der Unterschied zwischen Viren und zellulären Organismen immer weiter ab. Das würde sich außerdem mit der Auffassung decken, dass in dieser Frühzeit des Lebens der laterale/horizontale Gentransfer eine mindestens ebenso große Rolle spielte wie der vertikale (Vererbung). Und der laterale Gentransfer kann durch Viren vermittelt werden.

WENIGER IST MANCHMAL MEHR



In einem Skelettszintigramm leuchten Bereiche mit einem erhöhten Knochenstoffwechsel (Pfeile).

Der Nuklearmedizin geht Technetium-99 aus, da produzierende Reaktoren abgeschaltet werden (»Rückschlag für die Diagnostik«, Forschung aktuell, Spektrum Juli 2017, S. 24).

Michael Lemb, Donnern: Der von Ihnen angesprochene Mangel an Technetium ist der Nuklearmedizin (wie von Ihnen erwähnt) aus den Jahren 2009 und 2010 wohlbekannt. Bereits damals musste man mit Technetium sparsam umgehen und ansonsten auf Zyklotronprodukte ausweichen. Die Kassenärztliche Bundesvereinigung gestattete in dieser Mangelperiode vorübergehend für die Skelettszintigrafie die Verwendung von Fluor-18 an PET-Geräten. Dies hatte eine bedeutende Verbesse-

rung der Bildqualität zur Folge. An einem Fluor-18-Skelettszintigramm aus unserer Praxis (Bild links) sieht auch der medizinische Laie sofort, dass diese Aufnahmen schärfer und kontrastreicher sind als Ihr Bildbeispiel.

Daneben bietet dieses Verfahren eine deutlich bessere Differenzialdiagnose. Es ist ja keinesfalls so, wie Sie schreiben, dass die Skelettszintigrafie zuverlässig und sicher ist. Vielmehr ist sie übersensitiv. Nicht alles, was »leuchtet«, stellt eine Metastase dar. Ein Weniger an Technetium würde also die Diagnostik verbessern.

ANDERE PLAUSIBLE DEUTUNGEN

Streng genommen zählen die Vögel zu den Dinosauriern, erläuterte der Paläontologe Stephen Brusatte (»Das Puzzle der Vogelevolution«, Spektrum September 2017, S. 30).

H. Ullrich, Riesa: Die heute reichlich vorhandenen Daten in Form von Fossilien lassen die hier erzählte Geschichte von Stephen Brusatte über den Ursprung der Vögel durchaus zu, wenn man unter anderem darauf verzichtet, zu erklären, welcher Mechanismus in der Natur in der Lage wäre, etwas wie das Fliegen zu erfinden.

Die Reduktion der Zehenstrahlen wie auch die Entstehung von Federn sind aktuell Gegenstand kontroverser Debatten. Die Daten lassen auch andere plausible Deutungen beziehungsweise Geschichten zu, darüber wird leider im obigen Artikel weitestgehend geschwiegen.

Spektrum
der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

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

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

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

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

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg

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

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer

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

E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Claudia Hecker, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 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. 38 vom 1.1. 2017.

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

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

den Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen:

© 2017 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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

futur III HOMO HOHLWELT

Bloß nicht zu Einstein beten! **Eine Kurzgeschichte von Uwe Post**

Diesen Helm müssen Sie haben!«, predigte der dauergrinsende Shoppingkanal-Verkäufer. »Mega Poly-Gewebe voll mit Stahlbetongitter!« Von oben fiel ihm ein Gewicht epischer Größe (Aufschrift: drei Tonnen) auf den gelben Helm, es zerbrach dabei, dann folgte Gelächter vom Band. Weiterhin grinsend wischte sich der Mann unsichtbaren Staub vom feinen Hemd. »Bestellen Sie unseren neuartigen Schutzhelm noch heute, und Sie erhalten gratis dazu einen Preisnachlass in Höhe von sagenhaften Prozent! Denn wer weiß, was die Idioten auf der anderen Seite der Welt morgen auf Ihren Kopf fallen lassen!«

Das konnte man in der Tat nie wissen. Franzkevin, schon drauf und dran, die eingblendete Telefonnummer zu wählen, sah nach oben. Im Wohnzimmer, so vermutete er, drohte ihm keine unmittelbare Gefahr. Aber der Weg zur Uni! Lagen nicht lauter Leichen mit zertrümmerten Schädeln in der Gosse?

Nein, und warum nicht? Die Leute trugen Helme!

Franzkevin traf seine Kaufentscheidung zwischen Marmeladenbrot und Zähneputzen. Die Nummer der Bestellhotline hatte er sich auf die Schnelle nicht gemerkt, aber später, am Abend, würde er einfach so lange von Werbeblock zu Werbeblock zappen, bis der Spot wieder irgendwo lief. Oder er fragte Mondkalb in der Vorlesung. Mondkalb kannte sich aus. Sie trug sogar eine Brille.

Bevor Franzkevin sich auf den Weg zur Uni machte, begutachtete er sein

Erscheinungsbild im Spiegel: sträh-niger Blondschoopf, Marmelade im Mundwinkel, T-Shirt eine Nummer zu groß und faltiger als Oma Charlottes Gesicht.

»Gut siehst du aus«, sagte der Spiegel. Franzkevin nickte zufrieden.

Dann, draußen, zeigte sich keine Wolke am Himmel, nur der blaue Ätherdunst verbarg wie immer droben die gegenüberliegende Seite der Welt. So lief Franzkevin, den Blick stets gen Oben gegenüber, sein Sträßchen hinunter. Tauben sah er, die Fassaden der Vorstadt und sogar den Halbmond.

Eine Kreuzung weiter luden Ärzte gerade eine Verrückte in den Leichenwagen; schade um das Mädchen ... hübsche rote Haare, aber das Gesicht eine von schädlichen Gedanken verzerrte Maske. Hatte sie zu Einstein gebetet oder an Pfüsik geglaubt? Hatte Flachwelt-Blendwerk ihren Verstand benebelt, war sie unheilbar etwa gar an Theo-Rien erkrankt?

Rasch lief Franzkevin weiter, denn Theo-Rien waren ansteckend, und er wollte keine Experikremente bekommen. Er schüttelte sich, fast übel wurde ihm allein von dem Gedanken, so dass er lieber am nächsten öffentlichen Orgonstrahler stehen blieb und so lange Groschen einwarf, bis er sich besser fühlte.

Neben dem Strahler hielt eine Mama ihr Kleinkind ins Streufeld. Schmarotzer! Absorbierten die Nebenwellen des Strahlers, für den andere Leute bezahlten!

Mehr als einen bösen Blick warf Franzkevin der dreisten Dame nicht

zu, denn auf eine Ladung Pechspray im Gesicht (die rote Dose hing gut sichtbar an ihrem Gürtel) verzichtete er lieber. Sie würde schon früh genug ihre gerechte Strafe erleiden, denn sie trug keinen Helm.

Der Türsteher vor der Uni schickte Franzkevin erst einmal hinüber zum Müllsortieren, denn er war spät dran und der Hörsaal gerade voll. Also rümpfte er die Nase über löchrige Socken, knibbelte Fleischreste von explodierten Handys und las zwischendurch heimlich Reklameblättchen, die mit nackten Tatsachen für Fitness-Pralinen und Karmaschinken warben.

Als Franzkevin endlich in den Hörsaal durfte, winkte Mondkalb mit ihrem IQ-Fähnchen. »Wollte dich schon auf dem Friedhof besuchen! Aber du lebst ja doch noch!«

Franzkevin nickte säuerlich. »Wen haben wir heute?«

»Profäso Knarzt. Schlaf schön.« Mondkalb schob sich eine Haarsträhne zwischen die Lippen, nahm die Brille ab, legte den Kopf auf den Tisch und schloss die Augen.

Blöderweise war Franzkevin zu wach, um es sich ebenfalls gemütlich zu machen. Mondkalb besaß bereits sieben Diplome und drei Dokortitel, sie konnte sich das erlauben. Er selbst nicht. Irgendwann wollte auch er ein IQ-Fähnchen mit einer Zahl über 200 verliehen bekommen. Also hörte er dem Profäso angestrengt zu. Gerade baute dieser sich vor der großen Tafel auf, rückte seine silbergrau gelockte Perücke zurecht und räusperte sich.

**«Nicht die Welt ist hohl, der Mensch ist es»
Wang Frequent, Pfüsiker (letzte Worte vor seiner Hinrichtung)**

Die Studenten verstummten bis auf ein Schnarchen hier oder dort.

»Nachdem wir in der letzten Stunde mit der Einführung in die Historie der Überwindung der Schulbelastung durch König Donald I. begonnen haben, werde ich heute ausführlich auf die Korrekturen eingehen, die sich in jener bedeutsamen Zeit insbesondere gegen selbst ernannte Klimaforscher und Atomkraftgegner richteten ...«

Der Profäso säuselte ohne Punkt und Komma. Franzkevin spürte bleierne Müdigkeit und hieß sie willkommen.

Im Schlaf lernt man bekanntlich am besten, daher verließ Franzkevin prall erschlaut den Hörsaal und durfte dem Sammelbildspender am Ausgang seine Belohnung entkurbeln, weil er die heutige Quizfrage (»Ist die Welt hohl oder flach?«) richtig beantworten konnte. Sein Kärtchen zeigte ein rosa Kätzchen und trug die Kennung 104. Das Sammelbild entlockte Franzkevin ein Grinsen, denn es hatte ihm bisher gefehlt und ließ sein Diplom in greifbare Nähe rücken.

Als Franzkevin Richtung Mensa schlenderte, um einen Hohlburger mit Cola zu vertilgen, kam er an einem Menschenauflauf vorbei. Natürlich blieb er stehen und verfolgte, wie einige Studenten Kaffeebecher und Essensreste nach einem bärtigen Kerl warfen, der trotzig ein Schild hochhielt: »Nicht die Welt ist hohl, ihr seid es!«

Franzkevin verschaffte sich mit den Ellenbogen eine bessere Sicht. Ein echter Dissidäng! Der Vormittag wurde immer besser.

»Dummkopf!«, rief ein kahlköpfiger Student und warf eine leere Plastikflasche auf den Bärtigen, allerdings mit der Zielgenauigkeit eines Blinden.

»Nennt mich nicht dumm«, heulte das Opfer. »Ihr seid dumm! Macht

doch die Augen auf! Die Welt ist rund, nicht hohl!« Der Verrückte zeigte nach oben. »Oder habt ihr je die andere Seite gesehen?«

»Klar«, rief Franzkevin. »Dauernd! Im Fernsehen!«

»Pfütiker!«, schimpfte eine ältere Studentin, die neben Franzkevin stand. »Dsche-Nie!«

Dieses Schimpfwort kannte Franzkevin noch nicht. Vermutlich hatte die Studentin schon mehr Diplome als er und Mondkalb zusammen.

Zum Glück kam bald die Dummpolizei, um sich der Angelegenheit anzunehmen. Die gepanzerten Uniformierten bildeten einen Kreis und nahmen den Dissidäng fest, bevor er mitten auf dem Campus gelyncht werden konnte. Die Zuschauer jubelten, und die besonders schlaue Studentin steckte einem der Polizisten eine eilig am Wegesrand gepflückte gelbe Blume an die Rüstung.

Dann drehte sie sich um, hob andächtig die Hände und sang: »Die Polizei schützt uns Schlaue, endlich sterben die Dummen aus! Heil Hohlwelt, heil Hohlwelt!« Ergriffen sangen alle Studenten die Hymne mit, während die Sicherheitskräfte dem Dissidäng eine Beruhigungsspritze verpassten und ihn dann zu ihrem Einsatzwagen trugen. Das dauerte eine ganze Weile, denn niemand trat zur Seite, alle wollten ein Selfie mit dem Dissidäng und den fröhlichen Polizisten knipsen.

Endlich transportierte man den Dissidäng mit lautem Tatütata unter viel Jawoll! und Juchhu! ab.

Als sich die Menge der Schaulustigen langsam zerstreute, sah Franzkevin lange der besonders wortgewandten Studentin hinterher. Er wünschte sich, eines Tages auch ein so nützliches Mitglied der Gesellschaft

zu sein wie sie. Er nahm sich vor, in Zukunft noch eifriger zu studieren. Deshalb kaufte er sich sofort im Uni-Laden einen Dreierpack Bücher mit Tierfiguren zum Ausmalen, ein Wörterbuch Polnisch rückwärts und ein hellblaues Schlauschlumpf-Wassereis.

Genüsslich sein Eis schlürfend, setzte sich Franzkevin auf eine laut angebrachtem Piktogramm garantiert erdstrahlenfreie Bank. Konzentriert rechnete er mit dem Handy aus, wie viele Sammelbilder er noch brauchte. 15 minus 3, mal Hoch, plus Durch, also 0,43 weitere Semester Studium. Das war in ungefähr 13 Jahren zu schaffen.

Franzkevin zerbrach sich auf dem gesamten Heimweg den Kopf darüber, wieso die schlaue Studentin Wörter wie »Dsche-Nie« kannte, aber keinen Helm trug. Ganz sicher gab es dafür eine Erklärung, die er eines Tages verstehen würde, wenn er nur genug verschiedene Katzenbildchen gesammelt hatte.

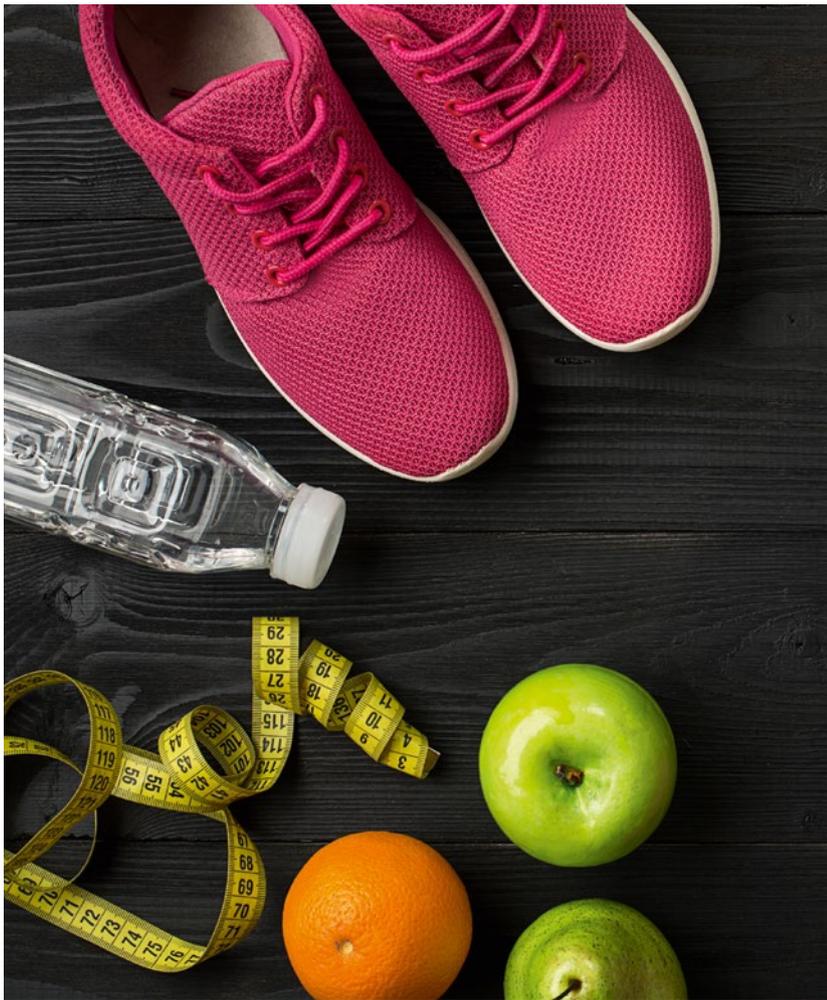
Abends, beim Zappen, erwischte Franzkevin versehentlich eine Nachrichtensendung. Die verkündete, dass der Dissidäng nach offiziellen Angaben der Behörden auf dem Weg in die psychotische Betreuung leider von einem Schiffswrack erschlagen worden war, das wegen eines zu schweren Ankers von der anderen Seite der Hohlwelt gefallen war.

So ein Pech! Aber, andererseits: Mit einem vernünftigen Helm wäre das nicht passiert!

DER AUTOR

Uwe Post, Jahrgang 1968, ist Chefentwickler der unabhängigen Spieleschmiede Ludetis. Er schreibt seit den 1990er Jahren satirische Sciencefiction. Er hat viele Kurzgeschichten und mehrere Romane veröffentlicht, zuletzt »Walpar Tonraffir und die Ursuppe mit extra Chili«.

VORSCHAU



SERGEY IMZAROV / GETTY IMAGES / ISTOCK

SPORT, ERNÄHRUNG UND KÖRPERGEWICHT

Übergewicht bis hin zur Fettleibigkeit hat in den westlichen Ländern epidemische Ausmaße angenommen. Viele Menschen essen nicht nur zu kalorienreich, ihre Nahrung ist auch problematisch zusammengesetzt, hat etwa einen zu hohen glykämischen Index. Neuere Untersuchungen belegen zudem, dass sportliche Aktivität sich deutlich weniger auf das Körpergewicht auswirkt, als viele annehmen. Einer schlechten Ernährung kann man somit nicht davonlaufen.



CHAN-JAGODINOW, S.O. - PIONIERE ZUR NEUEN SOZIALISTISCHEN ARCHITEKTUR IN DEN ZWANZIGER UND ZU BEGINN DER DREISSIGER JAHRE. VERLAG LÖCKER, WIEN-BERLIN, 1983, S. 287. MIT FOT. - GEN. VON H. ALTRICHTER

100 JAHRE RUSSISCHE REVOLUTION

Nachdem die Bolschewiki 1917 die Macht ergriffen hatten, versuchten Architekten und Stadtplaner, ihren Teil zum »neuen sozialistischen Menschen« beizutragen. Ihre Entwürfe wurden jedoch zum größten Teil nie verwirklicht.



ILLUSTRATION: MARK ROSS

GEFEIT GEGEN SCHWEFELWASSERSTOFF

H₂S wirkt auf unsere Sauerstoffversorgung und Zellatmung extrem giftig. Doch manche kleinen Fische haben es in ihrer Evolution »gelernt«, damit umzugehen. Ihre Tricks sind auch beim Thema Umweltverschmutzung interessant.



MEHDIANBUK / GETTY IMAGES / ISTOCK

MASCHINELLES LERNEN

Die etablierte Technik der neuronalen Netze hat durch eine Variante namens Deep Learning einen spektakulären Schub erfahren. Maschinen sind zu ungeahnten Lernleistungen fähig – was sowohl Begeisterung als auch Ängste erregt.

NEWSLETTER

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

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

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

Wunschgeschenk:

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

Keine Mindestlaufzeit:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:

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

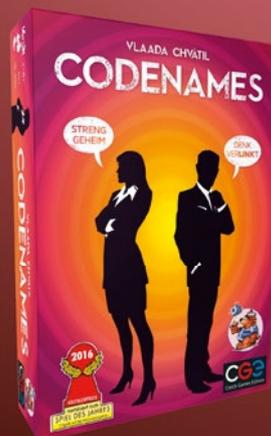
DIN-A5-Notizbuch

»Marie&Isaac&Albert&Stephen.«

Unser hauseigenes Notizbuch mit edlem Leineweinband, folienkaschierter Blindprägung, Farbschnitt sowie schwarzem Gummi- und Lesezeichenband. Mit dezentem Punktraster auf 160 Innenseiten 90-g-Premiumpapier gedruckt.



**Wählen
Sie Ihr
Geschenk**



Spiel »Codenames«

Ausgezeichnet als Spiel des Jahres 2016. Nur die Geheimdienstchefs kennen die Identitäten ihrer Agenten. Das Team, das als erstes alle Codenamen gefunden hat, gewinnt.

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 2.400 Profilen herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature