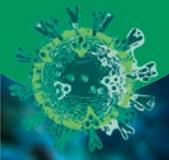


Spektrum

der Wissenschaft

Covid-19
IMPFSTOFF-
ENTWICKLUNG



Ursprung des Lebens

Entstanden die ersten
Zellen in tiefen Erdspalten?

RÖNTGENASTRONOMIE Kosmischen Exoten auf der Spur
BIRKENPECH Der Kunststoff der Neandertaler
FLEISCHERSATZ Burger aus Pflanzenproteinen

KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

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

€ 4,99
je digitale
Ausgabe



Bestellmöglichkeit und über 250 weitere Ausgaben:
www.spektrum.de/kompakt



EDITORIAL WO DIE URSUPPE BRODELTE

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

Die Fragen, wann, wie und wo das erste Leben entstand, gehören sicher zu den spannendsten der Evolutionsbiologie. Abschließende Antworten hat die Wissenschaft bis heute nicht gefunden: Spuren in Gesteinen aus Australien oder Kanada legen nahe, dass »unsere« Geschichte vor rund vier Milliarden Jahren begann, als sich aus anorganischen und organischen Substanzen die ersten Zellen bildeten. Ihnen folgten im Lauf der Erdzeitalter Explosionen der Artenvielfalt, aber auch immer wieder Rückschläge und Massenaussterben.

Doch wo fand der »Urknall« der Biologie statt? In flachen Küstengewässern, in denen starke UV-Strahlung chemische Reaktionen anheizte? Oder doch eher an den Schwarzen Rauchern der Tiefsee? Schließlich blüht hier bis in unsere Tage das Leben – völlig ohne Sonnenlicht und angetrieben von giftigem Schwefelwasserstoff, der aus diesen vulkanischen Schornsteinen austritt und Bakterien als Nahrung dient.

Der Geologe Ulrich C. Schreiber und der Physikochemiker Christian Mayer von der Universität Duisburg-Essen richten ab S. 12 ihren Blick auf einen weiteren außergewöhnlichen Lebensraum: Tiefe, wassergefüllte Erdspalten in der kontinentalen Kruste der jungen Erde könnten optimale Bedingungen zur Bildung der ersten zellenähnlichen Gebilde geboten haben. Gleichzeitig ist dieser Artikel der Auftakt zu unserer dreiteiligen Serie zur Evolution des tierischen Lebens.

Zu den größten Bedrohungen der heutigen Biodiversität gehört unser Hunger auf Fleisch: Weltweit fallen Wälder, um Platz zu schaffen für Weiden und Futterplantagen. Hier zu Lande erstickt extremer Stickstoffeintrag aus der Viehwirtschaft jegliche Vielfalt auf Äckern und Wiesen. Ein geringerer Fleischkonsum könnte der Natur dabei helfen, aber auch ein möglichst gelungener Ersatz durch Pflanzenproteine. M. Azad Emin beschreibt ab S. 46, wie weit die Wissenschaft hier bereits ist und was wir demnächst auf dem Teller erwarten können.

Diese Ausgabe ist mittlerweile die dritte, die wir wegen der Covid-19-Pandemie außerhalb unserer gewohnten Umgebung produzieren. Zwar haben wir uns mit den Umständen inzwischen recht gut arrangiert, trotzdem möchte ich Sie noch einmal um Verständnis bitten, sollte sich der eine oder andere Fehler mehr eingeschlichen haben, als Sie das von uns gewohnt sind.

Ich wünsche Ihnen eine spannende Spurensuche und weiterhin viel Gesundheit!

Ihr



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Physik – Mathematik – Technik 2.20 bietet einen Einblick in die bunte Welt der Chemie – mit Versuchen zum Selbstmachen.

IN DIESER AUSGABE



DORIS TSAO

Die Neurowissenschaftlerin und Mathematikerin hat entschlüsselt, wie das Gehirn Gesichter erkennt. Demnach steckt dahinter ein verblüffend simpler Code (S. 30)



BELINDA J. WILKES

Seit zwei Jahrzehnten arbeitet die Astrophysikerin im Team des Röntgenteleskops Chandra und leitet inzwischen dessen Beobachtungen. Ab S. 57 stellt sie die spektakulärsten Erkenntnisse vor.



PATRICK SCHMIDT

Hatte der Neandertaler gezielt einen Kunststoff entwickelt? Der naturwissenschaftliche Archäologe hat dazu eine sicher geglaubte These ins Wanken gebracht. Wie, das erklärt er ab S. 78.

INHALT

- 3 EDITORIAL
- 6 SPEKTROGRAMM
- 20 FORSCHUNG AKTUELL

Impfstoffsuche im Schnellgang

Genbasierte Vakzine
gegen Covid-19.



Vorhersage von Proteinstrukturen

Dank Informatik rückt das
Ziel in Reichweite.

Viele Wege führen zur Explosion

Supernovae laufen oft
anders ab als gedacht.

KI lernt die Sprache der Mathematik

Selbstlernendes Programm
löst Differenzialgleichungen.

- 29 SPRINGERS EINWÜRFE

Schwarzer Schwan im Internet

Unser verändertes Verhalten
täuscht Algorithmen.

- 64 SCHLICHTING!

Ringelnde Kondensstreifen

Komplexe Strömungen
zerreißen die Wolkenbänder.

- 86 ZEITREISE

- 87 FREISTETTERS FORMELWELT

Die Regel, der die Welt gehorcht

Vier Symbole stellen
eines der wichtigsten
Naturgesetze dar.

- 88 REZENSIONEN

- 93 IMPRESSUM

- 94 LESERBRIEFE

- 96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

- 98 VORSCHAU

TITELBILD:
DIVEDOG / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT;
VIRUS: KOTO_FEJIA / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT

12 EVOLUTION **IN DER TIEFE GEBOREN**

Neue Serie: Die Entfaltung des Lebens (Teil 1) Entstand das Leben in hydrothermalen Spalten der jungen Erdkruste? Hier gab es wohl geeignete Reaktionsbedingungen dafür – und ein langfristig stabiles Umfeld.

Von Ulrich C. Schreiber und Christian Mayer

30 HIRNFORSCHUNG **DER GESICHTSCODE**

Bestimmte Bereiche der Großhirnrinde sprechen auf Gesichter an. Die Neurone reagieren dabei auf Merkmale, die sich mathematisch beschreiben lassen.

Von Doris Y. Tsao

38 BIODIVERSITÄT **VERGESSENE KÖRNER**

Fast 90 Prozent der einst in Indien einheimischen Reissorten sind heute verschwunden. Der Autor kämpft darum, sie zu erhalten und wieder anzusiedeln.

Von Debal Deb

46 LEBENSMITTEL **PFLANZENPROTEINE FÜR FLEISCHFREUNDE**

Wie muss man pflanzliche Proteine verarbeiten, um überzeugende Fleischersatzprodukte herzustellen?

Von M. Azad Emin

Serie: Die Röntgen-Revolution (Teil 3)

52 RÖNTGENTELESKOPE **DAS ALL IN NEUEM LICHT**

Zur Untersuchung des Universums ist Röntgenstrahlung heute unverzichtbar. Ihr Siegeszug begann mit einer Zufallsentdeckung vor rund 60 Jahren.

Von Jan Hattenbach

57 ASTRONOMIE **RÖNTGENBLICK FÜR DEN KOSMOS**

Das Chandra-Weltraumteleskop liefert seit zwei Jahrzehnten faszinierende Aufnahmen von Galaxien, Sternen und Planeten im Röntgenlicht.

Von Belinda J. Wilkes

66 INFORMATIK **WIE KOMPLEX DARF ES SEIN?**

Ein Computer kann die Lösung eines Problems immer in vertretbarer Zeit überprüfen, sagt ein neuer Beweis – und widerlegt damit eine ganze Reihe etablierter Vermutungen aus der Mathematik und Physik.

Von Manon Bischoff

72 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **DIE KUNST DES GUTEN PASSWORTS**

Viele Leute verzweifeln bei der Wahl eines sicheren Kennworts.

Von Jean-Paul Delahaye

78 MENSCHWERDUNG **DER KUNSTSTOFF DER NEANDERTALER**

Schon vor 200 000 Jahren stellten frühe Menschen Birkenpech her, und zwar mit einer sehr aufwändigen Methode, wie viele Forscher glauben. Doch es könnte auch erstaunlich einfach gegangen sein.

Von Patrick Schmidt



12

TITELTHEMA
DIE ENTSTEHUNG DES LEBENS

DIVEDOR / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



30

HIRNFORSCHUNG
DER GESICHTSCODE

FRACIAL PICTURES / STOCK.ADOBE.COM

FOTO: ZOE SWITZ



38

BIODIVERSITÄT
VERGESSENE
KÖRNER



52

RÖNTGENTELESKOPE
DAS ALL IN NEUEM LICHT

NASA/SCIENCE & JOURNALISM

78

MENSCH-
WERDUNG
KUNSTSTOFF
DER ALT-
STEINZEIT



FOTO: FRANS DE VRIES, WWW.TIJDREELDEBAAN.NL



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

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

SPEKTROGRAMM

KOSMISCHES RIFF

▶ Seit April 1990 kreist das Hubble-Teleskop um die Erde. Bislang hat es rund 1,3 Millionen Bilder des fernen Weltalls gemacht. Zur Feier des 30. Geburtstag haben NASA und ESA nun eine besonders spektakuläre Aufnahme veröffentlicht: Sie zeigt zwei Riesennebel namens NGC 2014 und NGC 2020 in der Großen Magellanschen Wolke, einer 163000 Lichtjahre entfernten Satellitengalaxie unserer Milchstraße.

Das Bild trägt den Spitznamen »kosmisches Riff«, weil es nach der optischen Bearbeitung durch ein Team der NASA an eine Unterwasserwelt erinnert: Die Wissenschaftler haben, wie bei Hubbles Aufnahmen üblich, unterschiedlichen chemischen Elementen auffällige Farben zugeordnet, so dass ein möglichst großer Kontrast entsteht. Bei dem »roten« Nebel handelt es sich beispielsweise um Wasserstoffgas, das eine Gruppe junger, sehr massereicher Sterne unmittelbar nach ihrer Entstehung ins All geblasen hat. Der »blaue« Nebel links unten stellt hingegen leuchtende Sauerstoffatomen im Umfeld eines so genannten Wolf-Rayet-Stern dar, der durch rasante Sternwinde Teile seiner äußeren Schichten verloren hat.

Pressemitteilung der NASA, April 2020

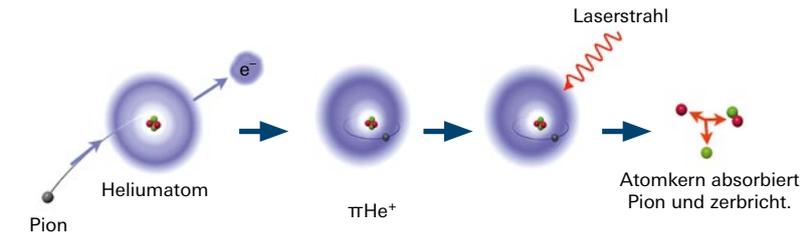


ATOMPHYSIK PIONISCHES HELIUM

Physiker am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching haben erstmals »pionisches« Helium hergestellt und untersucht. Bei ihm ist eines der beiden Elektronen in der Schale eines Heliumatoms durch ein negativ geladenes Pion ersetzt – ein kurzlebige Teilchen aus zwei Quarks, das deutlich schwerer als ein Elektron ist.

Für das Experiment kühlte das Team um Masaki Hori Helium auf zwei Grad über dem absoluten Nullpunkt ab, wodurch sich das Gas in eine Supraflüssigkeit ohne Reibung verwandelte. Anschließend beschossen die Forscher diese Quantenbrühe mit Pionen, wozu sie die weltweit stärkste Pionenquelle am Schweizer Paul Scherrer Institut nutzten.

In seltenen Fällen verdrängte eines der Teilchen dabei ein Elektron aus der Schale und nahm dessen Platz ein.



Physiker haben eines der Elektronen von Helium durch ein Pion (π) ersetzt.

Anschließend feuerten die Wissenschaftler Laserpulse auf das pionische Helium, was zuweilen auch das noch verbliebene Elektron aus dem Atom schleuderte.

Das Pion, das sich zuvor noch auf einer sehr weiten Bahn um den Kern bewegte, geriet dadurch auf eine Schale mit niedrigerer Energie – so nah am Kern, dass dieser schließlich instabil wurde und zerfiel. Die dabei freigesetzten Bruchstücke fingen die

Forscher als Erfolgsnachweis auf. In Isolation zerfallen Pionen bereits nach 26 Nanosekunden. An Helium gebunden verlängerte sich die Lebensdauer um ein Tausendfaches, so dass die Physiker das Konstrukt mit ihrem Laserpuls treffen konnten.

Insgesamt benötigten die Wissenschaftler acht Jahre, um exakt jene Lichtfrequenz zu finden, bei der das Experiment gelingt. Mit Hilfe des exotischen Atoms wollen sie künftig die Masse des Pions deutlich genauer bestimmen als bisher.

Nature 10.1038/s41586-020-2240-x, 2020

MATERIALWISSENSCHAFT EDELSTEIN MIT FARBWECHSEL

Alexandrit ist ein außergewöhnliches Material: 1830 in Russland entdeckt und nach dem späteren Zar Alexander II. benannt, ändern die seltenen Edelsteine je nach Beleuchtung ihre Farbe. Bei Tageslicht leuchten sie grün wie ein Smaragd, bei Kerzenschein hingegen rubinrot.

Forscher vermuten schon lange, dass das besondere Farbenspiel mit winzigen Verunreinigungen zusammenhängt: Chromatome im Inneren des Kristalls absorbieren blaues und gelbes Licht, so dass

Alexandrit nur den grünen und roten Teil des Lichtspektrums reflektiert. Da Kerzenlicht mehr Rotanteile enthält als Sonnenstrahlen, lässt sich der Farbwechsel in verschiedenen Umgebungen zumindest teilweise erklären.

Daneben scheint aber auch eine Besonderheit der menschlichen Wahrnehmung eine Rolle zu spielen, wie nun eine Gruppe um David Dunstan

von der Queen Mary University in London berichtet. Die Forscher haben sich zwei Edelsteine aus dem Naturhistorischen Museum in London ausgeliehen und verschiedene Tests auf Farbtafeln mit ihnen durchgeführt.

Demnach sendet Alexandrit bei Kerzenschein auch grüne Wellenlängen aus sowie etwas rotes Licht bei Tageslicht. Da aber sämtliche Zwischentöne fehlen, springt unser Gehirn nicht auf diese Signale an: Normalerweise weist es geläufigen Gegenständen feste Farben zu, welche die Objekte auch dann behalten, wenn sich die Beleuchtung stark verändert. Ein grüner Apfel erscheint uns daher selbst bei Sonnenuntergang noch grün. Bei Alexandrit scheint diese als Farbkonzanz bekannte Korrektur nicht zu funktionieren – was den Forschern zufolge den Chamäleoncharakter der Edelsteine erklärt.

Science Advances 10.1038/s41598-020-62707-3, 2020

Je nach Beleuchtung verändert Alexandrit seine Farbe: Bei Tageslicht erscheint der Edelstein grün, bei Kerzenschein rötlich.



ALAMY / NATURAL HISTORY MUSEUM LONDON / HARRY TAYLOR

PALÄONTOLOGIE DAS LEBEN DER SPINOSAURIER

► Dass der 18 Meter lange *Spinosaurus aegyptiacus* Zeit im Wasser verbrachte, ist schon lange klar: Der gedrungene Körperbau der Dinosaurierart war nicht zum Sprinten geeignet. Auch die nach oben orientierten Nasenlöcher sprechen für regelmäßiges Plantschen, genauso wie die Zähne, die perfekt waren für das Fangen schlüpfriger Fische.

Allerdings gingen Forscher bisher davon aus, dass das riesige Reptil durch flaches Wasser watend auf Fischzug ging. Dem widersprechen nun Wissenschaftler um Nizar Ibrahim von der University of Detroit in Mercy: *Spinosaurus aegyptiacus* sei ein echter Schwimmer gewesen, der sich wie heutige Krokodile fortbewegte, und so möglicherweise tief in Gewässer vordrang.

Die Forscher machen dies am kräftigen Schwanz der ausgestorbenen Art fest, deren abstehende Dornen wie Paddel wirkten. Insgesamt müsste die Schwanzform der Riesenechse vergleichbar viel Vortrieb erzeugt haben wie die eines Krokodils oder eines im Wasser lebenden Molchs, schreiben die Forscher nach Versuchen im Strömungskanal mit einem Robotermodell.

Hinter der Entdeckung steckt eine aufwändige Suche nach fossilen Resten des *Spinosaurus*, von dem man bislang nur vereinzelte Bruchstücke



Spinosaurier waren gefürchtete Jäger, die sich schnell durch Wasser bewegen konnten.

hatte, nachdem das besterhaltene fossile Exemplar im Zweiten Weltkrieg zerstört worden war.

Fündig wurde das Ausgraberteam letztlich in der marokkanischen Kem-Kem-Formation, einem alten Flusssystem, in dem neben *Spinosaurus* auch riesige Sägerochen und mehrere Meter lange Lungenfische lebten. Von

2015 bis 2019 gruben Ibrahim und seine Kollegen hier den Schwanz des 95 Millionen Jahre alten, noch nicht ganz ausgewachsenen Tiers aus, der jetzt die Vorstellung von der Lebensweise des Giganten revolutionieren könnte.

Nature 10.1038/s41586-020-2190-3, 2020

Das Skelett eines Spinosauriers, rekonstruiert aus vielen Bruchstücken.



■ Ausgrabungen 2007/2008
■ Ausgrabungen 2015–2019
■ aus Schutt gesiebte Bruchstücke

MARCO AUDITORE, PALEO-ILLUSTRATOR

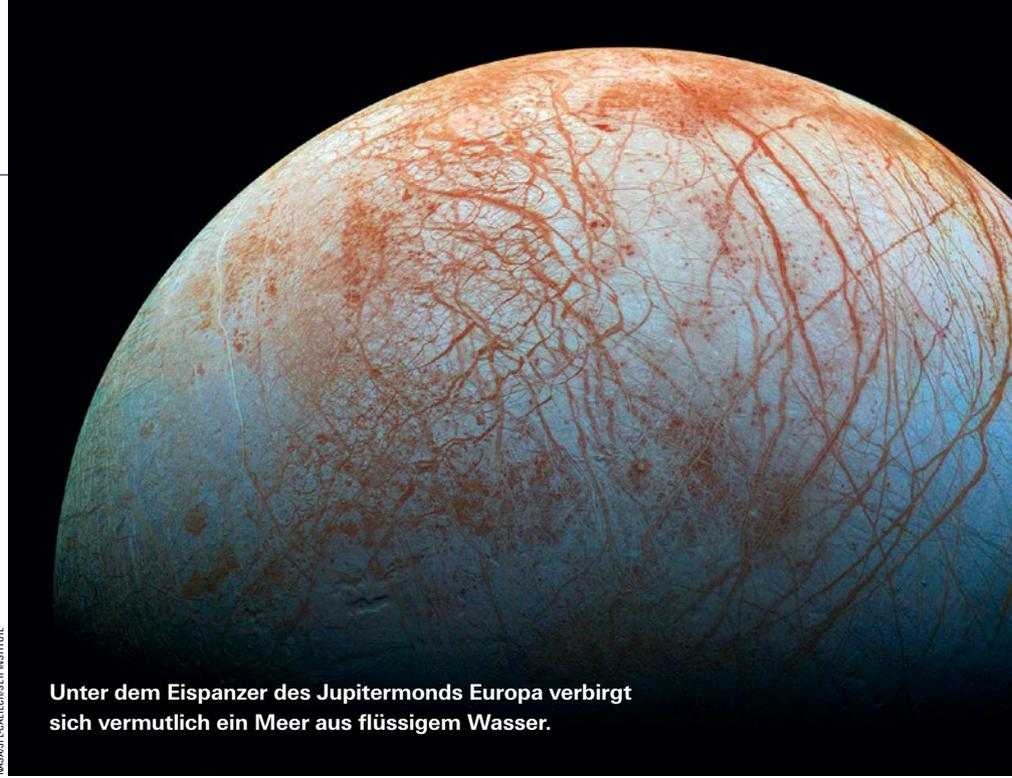
DAVIDE BORGONOMA, PALEOARTIST

SONNENSYSTEM FONTÄNE AUF JUPITERMOND

► Der Jupitermond Europa ist einer der außergewöhnlichsten Orte im Sonnensystem: Seine Oberfläche ist überzogen von einem dichten Eispanzer, unter dem vermutlich ein ausgedehnter Ozean schlummert. Und vielleicht hatte eine Raumsonde der Menschheit bereits Kontakt mit dem Wasser von dort: Vor 20 Jahren könnte die NASA-Mission Galileo eine Wolke aus Wasserdampf durchquert haben, die Geysire auf Europas Oberfläche ins All gepustet haben.

Die Vermutung gibt es schon länger, doch nun präsentiert ein Team um Hans Huybrighs von der ESA neue Belege dafür. Sie verbergen sich in Messdaten aus dem Januar 2000, denen zufolge Galileo während eines Vorbeiflugs deutlich weniger energiereiche Protonen aufgefangen hat als erwartet. Große Mengen der geladenen Teilchen kreisen ständig im Magnetfeld des Jupiters, das bis über die Bahn von Europa hinausreicht.

Bisher gingen Wissenschaftler davon aus, dass sich Galileo zu diesem Zeitpunkt im Windschatten des Trabanten bewegte, es also eine einfache



Unter dem Eispanzer des Jupitermonds Europa verbirgt sich vermutlich ein Meer aus flüssigem Wasser.

Erklärung für das Abschwellen des Teilchenstroms gibt. Das passt jedoch nicht zu aufwändigen Simulationen, die das Team um Huybrighs durchgeführt hat.

Sie lassen sich nur dann mit den Messdaten in Einklang bringen, wenn Galileo durch eine Wolke aus Wasserdampf flog, in der die zirkulierenden Protonen mit Molekülen kollidierten. Dabei hätten die Ladungsträger den Molekülen Elektronen geklaut, wodurch sie zu neutralen Atomen wurden. Diese konnte das Messgerät an

Bord der Sonde dann nicht mehr registrieren, was die geringere Protonenrate erkläre, so die Forscher.

Europa ist nicht der einzige Trabant mit Wasserdampffontänen: Beim Saturnmond Enceladus – ebenfalls eine Eiswelt mit verborgenem Ozean – konnte die Sonde Cassini solche Ausstöße sogar hin und wieder fotografieren. Beide Orte gelten als mögliche Aufenthaltsorte für außerirdische Mikroben.

Geophysical Research Letters
10.1029/2020GL087806, 2020

HIRNFORSCHUNG DEM GEHIRN BEIM ERINNERN ZUGESCHAUT

► Ein Duft oder eine Melodie aus der Kindheit reichen aus, um uns in Sekundenbruchteilen zurück in die Vergangenheit zu versetzen. Doch was genau passiert im Gehirn, wenn wir uns erinnern? Durch Tierexperimente weiß man bereits: Wird eine Erfahrung im episodischen (autobiografischen) Gedächtnis gespeichert, so geht dies mit einem spezifischen Entladungsmuster einzelner Neurone einher – beim Erinnern wird dieses Muster genauso wieder reaktiviert.

Wissenschaftler von den National Institutes of Health in Bethesda haben es nun erstmals geschafft, diesen Prozess bei Menschen in Echtzeit

aufzuzeichnen. Gelungen ist ihnen das bei Epilepsiepatienten, denen zuvor Elektroden ins Hirn implantiert worden waren, um den Anfallsherd zu lokalisieren. Wenn keine andere Therapie mehr hilft, kann man dann gegebenenfalls die entsprechende Hirnregion operativ entfernen.

Im Zuge dieser Untersuchungen führte das Team um Alex Vaz einen Gedächtnistest mit den Teilnehmern durch. Sie sollten sich verschiedene Wortpaare einprägen, wie etwa »Fuchs« und »Kuchen«. Die Forscher fanden heraus, dass Neurone des Sprachzentrums im Schläfenlappen bei jedem Paar in einer bestimmten

Frequenz feuerten. Während eines anschließenden Abrufttests sahen die Teilnehmer jeweils eines der Worte am Bildschirm und sollten sich an das zweite Wort erinnern. Bei richtigen Antworten wurde Millisekunden vorher dasselbe Aktivierungsmuster wie zuvor beim Einprägen wieder abgespielt. Die Forscher konnten daran vorhersagen, ob sich ein Proband erfolgreich erinnern würde. Laut Vaz und seinen Kollegen können die Erkenntnisse nicht nur dabei helfen, die grundlegenden Prinzipien, sondern auch Störungen des menschlichen Gedächtnisses besser zu verstehen.

Science 10.1126/science.aba0672, 2020

GESCHICHTE SÜDAMERIKA VOR KOLUMBUS

Die Geschichte Südamerikas weist deutlich größere Lücken auf als die anderer Erdteile. Ein Grund dafür ist, dass keine der Gemeinschaften aussagekräftige Schriftdokumente hinterlassen hat – die ersten Berichte stammen von den europäischen Eroberern aus dem 16. Jahrhundert. So blieben lange nur archäologische Ausgrabungen, um die Lebensweise der längst untergegangenen Kulturen zu rekonstruieren.

Seit einigen Jahren eröffnen zusätzlich dazu Genanalysen ein Fenster in die Vergangenheit des Südkontinents. Eine neue derartige Untersuchung haben nun Forscher um Nathan Nakat-

suka von der Harvard Medical School vorgestellt. Sie basiert auf Proben von 89 Individuen, die vor 500 bis 9000 Jahren an verschiedenen Orten im Andenraum lebten.

Die Studie zeichnet das Bild eines Kontinents, der lange Zeit von weitgehend isolierten Gruppen bewohnt war: Bereits vor 9000 Jahren unterschieden sich die Genpools von Hochland- und Küstenregionen deutlich. Vor 5800 Jahren spalteten sich dann auch die Bewohner der Anden in eine nördliche und eine südliche Kultur auf.

Anschließend scheint es eine Zeit lang zu verstärktem Austausch zwischen den Völkern gekommen zu sein, der jedoch vor 2000 Jahren zum Erliegen kam: Für 1500 Jahre, bis zur Blüte des expansiven Inkareichs, haben sich die Populationen offenbar

kaum noch vermischt. Erklären ließe sich das, mutmaßen die Forscher, wenn damalige Imperien ihre Dominanz auf indirektem, kulturellem Weg ausübten, also nicht mit Armeen dauerhaft andere Landstriche zu besetzen.

Eine Ausnahme dürfte neben den Inka auch die Tiwanaku-Kultur gewesen zu sein: Genproben aus den Metropolen der beiden präkolumbischen Völker weisen jeweils eine große Diversität auf. Einige der Bewohner stammten offenbar aus mehr als 1000 Kilometer entfernten Regionen, starben dann jedoch in den Städten der damaligen Zeit. Für die Forscher ist das ein Indiz für weit reichende Handelsverbindungen und eine kosmopolitische Lebensweise.

Cell 10.1016/j.cell.2020.04.015, 2020

BIOLOGIE WIRBELSTÜRME FORMEN ECHSENFÜSSE

Hurrikane haben einen dauerhaften Einfluss auf die Evolution von Eidechsen in der Karibik. Zu diesem Ergebnis kommt eine Arbeitsgruppe um Colin M. Donihue von der Washington University in Saint Louis. Echsen der Gattung *Anolis* auf Inseln, die häufiger von Wirbelstürmen betroffen sind, haben demnach größere Haftflächen an den Zehen als andere.

Das Team nutzte Hurrikandaten aus sieben Jahrzehnten, um 188 verschiedene *Anolis*-Arten aus der Karibik sowie zwölf Populationen der Bahama-*Anolis* (*Anolis sagrei*) von verschiedenen Inseln zu vergleichen. Bei beiden Untersuchungen fand die Gruppe einen Zusammenhang zwischen den Zehenpolstern und der Hurrikanhäufigkeit.

Je besser sich eine Eidechse festhalten kann, desto größer sind ihre Überlebenschancen bei Sturm. Dafür haben Echsen der Gattung *Anolis* haftende Zehenpolster, ganz ähnlich wie Geckos. Und je größer die Partie, desto fester der Griff. 2017 entdeckten Fachleute nach den Wirbelstürmen Maria und Irma, dass auf den betroffe-

nen Inseln nur die greifstärksten Echsen überlebt hatten und ihre Nachkommenschaft mit besonders großen Zehenpolstern ausgestattet war.

Doch spielen Wirbelstürme auch langfristig eine Rolle bei der Evolution von Echsenfüßen, oder werden diese seltenen Extremereignisse vom Se-

lektionsdruck alltäglicher Umstände überlagert? Die neue Analyse von Donihues Team spricht nun dafür, dass Naturkatastrophen auch charakteristische Gemeinsamkeiten einer Art erzeugen können.

PNAS 10.5061/dryad.wm37pvmjh, 2020

COLIN DONIHUE, WASHINGTON UNIVERSITY IN ST. LOUIS (MOSETU)



Bei starkem Wind halten sich Eidechsen an Ästen fest. Offenbar entwickelten sie dadurch stark haftende Zehenpolster.

EVOLUTION IN DER TIEFE GEBOREN

Entstand das Leben in hydrothermalen Spalten der jungen Erdkruste? Hier gab es wohl geeignete Reaktionsbedingungen dafür – und ein langfristig stabiles Umfeld.



Ulrich C. Schreiber (links) ist Professor für Geologie an der Universität Duisburg-Essen. **Christian Mayer** ist ebenda Professor für Physikalische Chemie.

» [spektrum.de/artikel/1736672](https://www.spektrum.de/artikel/1736672)

SERIE

Die Entfaltung des Lebens

Teil 1: Juli 2020

In der Tiefe geboren

Ulrich C. Schreiber und Christian Mayer

Teil 2: August 2020

Der Aufstieg der Tiere

Rachel A. Wood

Teil 3: September 2020

Morgenröte der Säuger

John Pickrell

Die Frage, woher das Leben kommt, ist eine der größten der Wissenschaft. Es existieren verschiedene Vorstellungen hierzu; als mögliche Entstehungsorte sind etwa heiße Quellen am Meeresgrund, oberirdische Tümpel oder gar ferne Himmelskörper im Gespräch. In den zurückliegenden Jahren haben wir ein alternatives Modell entwickelt. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es heute noch existierenden Rahmenbedingungen unterliegt und gleichzeitig an Milliarden Jahre alten geologischen Strukturen überprüft werden kann. Unserer Ansicht nach könnten sich ein großes Spektrum organischer Moleküle und auch die ersten lebenden Zellen in tiefen Spalten der kontinentalen Kruste gebildet haben. Schon vor Jahrmilliarden gab es tektonische Bruchzonen, die den Erdmantel mit der Erdoberfläche verbanden und in denen Gase und Flüssigkeiten

In tief hinabreichenden Klüften der Erdkruste, in denen wässrige Lösungen und andere Flüssigkeiten zirkulieren, sind möglicherweise die ersten Lebewesen entstanden.

zirkulierten. In diesen Spalten herrschen hydrothermale Bedingungen, das heißt, das Wasser dort kann auf Grund der hohen Drücke noch bei weit über 100 Grad Celsius flüssig sein und somit sehr viele gelöste Gase und Minerale enthalten. Die Bedingungen für die Entstehung von Leben waren dort wahrscheinlich günstig.

Bruchzonen infolge von tektonischen Prozessen durchziehen in vielen Fällen die komplette Erdkruste und reichen bis hinab in den oberen Erdmantel. Eine der größten und bekanntesten ist die San-Andreas-Verwerfung im Westen der USA. Solche Risse entstehen überwiegend durch Seitenverschiebungen, an ihnen driften also Platten der äußersten, starren Schicht der Erde aneinander vorbei. Dabei kommt es zu mechanischen Spannungen, die sich immer wieder in Erdbeben entladen. Das eröffnet Wege, in denen wässrige Lösungen, Gase oder – in aktiven Vulkangebieten – auch Magmen hochsteigen können.

Zahlreiche Seitenverschiebungen finden sich etwa im Rheinischen Schiefergebirge in der Eifel, auf der Oberfläche erkennbar an herausgewitterten Quarzgängen. Obwohl sie wesentlich kleiner sind als die San-Andreas-Verwerfung, weisen sie Kanäle auf, die bis in den Erdmantel reichen und vielerorts charakteristische Gase durchleiten. Entlang ihrer Störungszonen treten gehäuft Mineralbrunnen auf mit eisenreichem saurem Wasser sowie Mofetten, also Austrittspunkten von Kohlenstoffdioxid (CO₂). Selbst in kleinsten Pfützen bilden sich hier nach längerem Regen Eisenkolloide auf dem Grund und feine Filme oxidierenden Eisens auf der Wasseroberfläche (»Schwimmeisen«), sofern sie Kontakt zu den austretenden Gasen haben. In Wallenborn, südlich von Gerolstein in der Eifel, ist ein Kaltwassergeysir aktiv, der durch starken Zustrom von CO₂ etwa zweimal pro Stunde einen Wasserschwall in die Höhe schießt.

In den zurückliegenden Jahren hat einer von uns (Schreiber) Geländearbeiten zur Tektonik in der Eifel durchgeführt. Dabei analysierten wir wässrige Lösungen und Gase, die mit den Störungszonen in Zusammenhang stehen. Anhand der dabei gewonnenen Daten erkannten wir im Lauf der Jahre, dass die Störungen mehr darstellen als Brüche im Gestein und Aufstiegswege für Fluide. Vielmehr enthalten

AUF EINEN BLICK UNTER HITZE UND DRUCK

- 1** In wassergefüllten Spalten der jungen Erdkruste waren die Bedingungen für die Geburt des Lebens wahrscheinlich günstig: Hier gab es hohe Temperaturen und Drücke sowie ein chemisch komplexes Umfeld.
- 2** Experimente haben belegt, dass sich unter diesen Bedingungen diverse organische Moleküle und zellähnliche Vesikel spontan bilden können.
- 3** Auf diese Weise könnten erste selbstreplizierende Strukturen entstanden sein, aus denen lebende Zellen hervorgingen.

sie alle chemischen Stoffe, die mutmaßlich für die Entstehung des Lebens notwendig waren. Neben Wasser, das in den Spalten der Erdkruste diverse gelöste Metalle mit sich führt, gibt es hier CO₂, Kohlenstoffmonoxid, Wasserstoff und Stickstoff. Sogar Ammoniak, Methan, Zyanwasserstoff und Schwefelgase können Teil des Cocktails sein, jedenfalls in bestimmten Regionen, in denen magmatische Prozesse in der tieferen Kruste stattfinden. Zudem liegen Phosphate vor, die aus der Umwandlung des Minerals Apatit stammen, welches im Gestein häufig vorkommt. Diese Stoffe braucht man zur Bildung von Aminosäuren, Zuckerverbindungen und Nukleinbasen – also den Bausteinen des Lebens. In den tiefen Spalten der Erdkruste standen sie höchstwahrscheinlich schon während der Frühphase der Erde dauerhaft in großen Mengen zur Verfügung.

Einfache Ausgangsstoffe, komplexe Produkte

In der technischen Chemie nutzt man das Verfahren der Fischer-Tropsch-Synthese, um unter hohen Drücken und Temperaturen aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff langkettige organische Moleküle herzustellen – etwa für die Treibstoffproduktion. Ganz ähnliche Moleküle sind aber auch Grundbausteine von Zellen, etwa jene Lipide, aus denen sich die Zellmembran zusammensetzt. Die Reaktionsbedingungen und Ausgangsstoffe, die für eine Fischer-Tropsch-Synthese erforderlich sind, liegen noch heute im Innern der Erdkruste vor – ein geeignetes Umfeld für die Bildung der ersten Zellen?

Dies diskutierten wir mit Kolleginnen und Kollegen aus allen Bereichen der Naturwissenschaften und stellten dabei diverse Aspekte tektonischer Störungszonen auf den Prüfstand. Zunächst fragten wir uns, ob diese Spaltensysteme weitere Vorteile geboten haben mochten, um die Entstehung des Lebens zu ermöglichen. Sofort rückte in den Blick, dass sie vor Sonnenwind und UV-Strahlung geschützt waren. Auch von Meteoriteneinschlägen waren sie nur punktuell betroffen. Zugleich kann ihre Lebensdauer äußerst lang sein: Mehrere zehn Millionen bis hunderte Millionen Jahre sind dokumentiert.

Entlang dieser tiefen, verzweigten Spalten gibt es zahllose, mit Fluiden gefüllte Kammern mit einer Größe zwischen wenigen Mikrometern bis in den Meterbereich. In ihnen sind chemische Reaktionen möglich, die an der Erdoberfläche nicht stattfinden können. Mit jedem Meter abwärts ändern sich Druck, Temperatur und pH-Wert – je nach Wasserzutritt oder Mischung gelöster Gase. Moleküle, die sich unter hohen Drücken und Temperaturen gebildet haben, können aus der Tiefe mit aufsteigenden Fluiden in höhere Reaktionskammern gelangen und sich dort mit anderen Molekülen zu komplexeren Verbindungen zusammenschließen. Dass in wässrigen Lösungen, die Ammoniak, Wasserstoff und Methan enthalten, unter Hitze und Druck zahlreiche organische Substanzen entstehen können wie Lipide, Aminosäuren und Nukleinbasen, ist bereits mehrfach belegt worden – etwa in »Ursuppen«-Versuchen wie dem Miller-Urey-Experiment und seinen Abwandlungen.

Unser Wissen über die frühe Entwicklung unseres Planeten hat in den zurückliegenden Jahrzehnten so weit zugenommen, dass sich inzwischen ein grobes geophysi-

kalisches Bild der Anfangsphase abzeichnet. Nach einer ersten Abkühlungsphase bildete die junge Erde eine relativ einheitliche Kruste. Laut jüngeren Modellen kollidierte sie dann mit einem Kleinplaneten, was zu erneuter Aufschmelzung und der Entstehung des Mondes führte. Die Erde kühlte anschließend abermals ab und bildete wieder eine dünne Kruste, überwiegend aus Basalt. Daraufhin brachten magmatische Prozesse im Mantel und das Wiederaufschmelzen von Krustenfragmenten allmählich ein Gestein hervor, das eine andere Zusammensetzung und Dichte besaß als die basaltische Kruste: Die Bildung der kontinentalen Kruste setzte ein. Ihr Gehalt an radioaktiven Elementen lag anfangs höher als heute, sie war wärmer und vermutlich dünner als die derzeit durchschnittlichen 30 Kilometer. Im Vergleich zur damaligen, wenige Kilometer mächtigen basaltischen Kruste, die sich grob mit der heutigen ozeanischen Kruste vergleichen lässt, war sie aber wesentlich kühler – und vor allem chemisch und mineralogisch sehr viel komplexer zusammengesetzt.

Aus dem Erdmantel stiegen durch Störungszonen hindurch Fluide durch die Kruste auf, die sich auf dem Weg nach oben chemisch veränderten. In der Tiefe bestanden sie höchstwahrscheinlich, ebenso wie heute, aus einer Mischung überkritischen Wassers und überkritischer Gase. Im überkritischen Zustand lassen sich die flüssige und die gasförmige Phase nicht mehr voneinander unterscheiden, weil sich ihre Dichten einander angleichen und die Verdampfungswärme gegen null geht. Überkritische Fluide zeichnen sich zudem durch eine sehr niedrige Oberflächenspannung aus.

Typischer Verlauf einer verspringenden tektonischen Störung. Steigen darin Fluide auf, können sie sich unter Vorsprüngen und in Kammern (Pfeile) sammeln und dort gasdicht verschlossene Reaktionsräume bilden.



FREDERIK KRIST, MIT FRIL GEN, VON ULRICH SCHREIBER, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Es hängt von der Temperatur der Erdkruste ab, in welcher Tiefe das Wasser in den hydrothermalen Spalten vom überkritischen in den flüssigen Zustand übergeht. Der Wechsel erfolgt bei knapp 375 Grad Celsius und einem Druck von 221 Bar, was bei den Verhältnissen auf der frühen Erde in vielleicht 7 Kilometer Tiefe erreicht wurde. Dort trennten sich die mit dem Wasser vermischten überkritischen Gase von dem jetzt flüssigen Wasser und stiegen als Tropfen auf Grund ihrer geringeren Dichte weiter nach oben. Zu ihnen gehörte Kohlenstoffdioxid, das ab zirka 31 Grad Celsius und 74 Bar überkritisch wird.

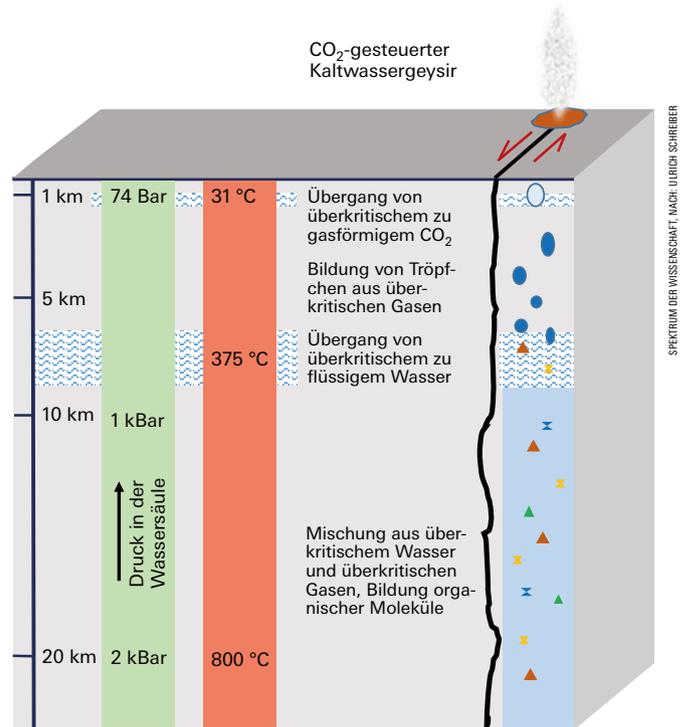
Überkritische Gase sind unpolare Lösungsmittel: Sie verhalten sich wie Flüssigkeiten, die wasserunlösliche organische Verbindungen aufnehmen und transportieren können. Stiegen sie in den Bruchzonen nach oben, sammelten sie sich in Gesteinskammern und unter Spaltenvorsprüngen an. Dabei bildeten sie gasdicht verschlossene Reaktionskammern, in denen hohe Temperaturen herrschten. In ihnen und besonders an ihren Grenzflächen zur wässrigen Phase hin waren Reaktionen möglich, die im Wasser allein nicht stattfinden konnten.

In einer Tiefe zwischen 1000 und 750 Meter, je nach Temperatur und Dichte der Wassersäule darüber und je nach Temperatur der umgebenden Erdkruste, wurden die überkritischen CO₂-Tröpfchen unterkritisch. Es entstand CO₂-Gas, das die aufgesammelten organischen Bestandteile nicht mehr gelöst halten konnte. Die Substanzen fielen aus und konzentrierten sich in der verbliebenen wässrigen Lösung und an den Grenzflächen von Wasser zu Gas.

Oberirdische Ausbrüche bewirken unterirdische Druckschwankungen

Eine besonders interessante Situation bieten niedrig temperierte Geysire, deren Eruptionen durch starken Gaszustrom gesteuert werden – etwa im bereits erwähnten Kaltwassergeysir Wallenborn in der Eifel. Bei jedem Ausbruch treten in der Tiefe Druckschwankungen auf, wodurch sich der Bereich, in dem überkritisches CO₂ in die Gasphase übergeht, ständig verlagert. Im überkritischen CO₂ ist immer etwas Wasser gelöst. Nimmt der Druck infolge eines oberirdischen Geysirausbruchs plötzlich ab, kondensiert das Wasser im entstehenden CO₂-Gas und bildet Nebeltröpfchen. Moleküle, die eben noch in der überkritischen Phase gelöst waren, gehen jetzt ins Innere dieser Tröpfchen oder bilden eine Hülle um sie, etwa aus Lipiden. Auch die Grenzfläche der eben noch existierenden Reaktionskammer zum umgebenden Wasser wird von Lipiden besetzt. Sinken die beladenen Wassertröpfchen auf diese Grenzfläche, werden sie häufig mit einer zweiten Lipidhülle ummantelt. So entstehen Vesikel als mögliche Vorläufer der ersten Zellen, wie wir schon 2015 experimentell zeigen konnten.

Dass es in der Frühphase der Erde bereits ein breites Spektrum organischer Moleküle auf dem Planeten gab, lässt sich noch heute belegen. Hydrothermal gebildete Quarzgänge haben vor mehr als drei Milliarden Jahren eine Vielzahl von Molekülen eingeschlossen, die sehr wahrscheinlich in abiotischen Prozessen entstanden waren – darunter beispielsweise Alkane, Halogenkohlenwasserstoffe, Alkohole und Aldehyde. Wir haben sie gemeinsam mit



Steigen Fluide in tektonischen Störungszonen auf, wechseln sie irgendwann vom überkritischen in den flüssigen oder gasförmigen Zustand.

Oliver J. Schmitz von der Universität Duisburg-Essen und weiteren Kollegen 2017 in Flüssigkeitseinschlüssen archaischer Quarze im westlichen Australien nachgewiesen. Aus den langen Kohlenwasserstoffketten der Aldehyde, die wir dabei fanden, lassen sich leicht Lipide bilden.

Den Prozess der Vesikelbildung wiederum haben wir im Labor nachvollzogen. Wir setzten hierfür eine Hochdruckanlage ein, die Drücke bis 1000 Bar bei Temperaturen über 100 Grad Celsius erzeugen kann und somit erlaubt, die Verhältnisse in einer Bruchzone in ein bis sieben Kilometer Tiefe zu simulieren. Selbst Druckschwankungen lassen sich erzeugen, wie sie etwa infolge von Geysiraktivität auftreten. Unter diesen Verhältnissen gelang es uns, Vesikel aus »amphiphilen« Substanzen (die sich sowohl in polaren als auch unpolaren Lösungsmitteln lösen lassen) im 20-Minutentakt herzustellen und wieder zerfallen zu lassen. Gaben wir zwölf verschiedene Sorten von Aminosäuren zu, von denen belegt ist, dass sie sich unter den hydrothermalen Bedingungen einer Bruchzone spontan bilden können, entstanden ohne weiteres Zutun Aminosäureketten mit bis zu 18 Einheiten – also Peptide.

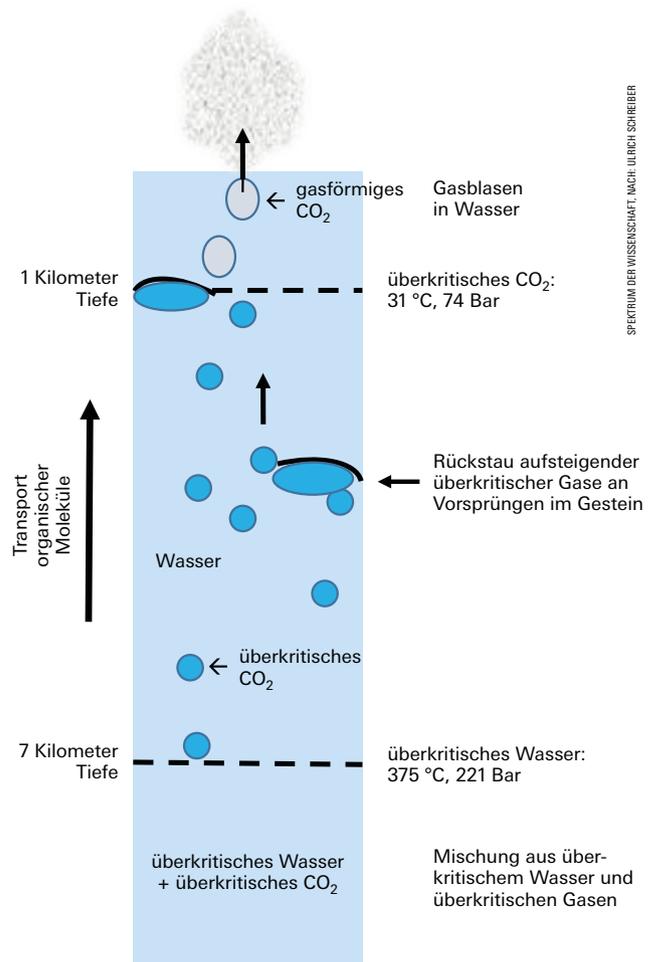
Einer von uns (Mayer) simuliert in mittlerweile seit zwei Jahren laufenden Experimenten die für Geysire typischen Druckschwankungen und lässt sie auf eine Mischung aus Wasser, CO₂, Aminosäuren und amphiphilen Substanzen einwirken. Hierbei treten interessante Wechselwirkungen zwischen den sich bildenden Peptiden und den Membranen der Vesikel auf. Es kommt zu zwei sich wechselseitig verstärkenden Selektionsprozessen: Zum einen sammeln sich in den Membranen solche Peptide an, die mit ihrer

Verteilung von hydrophilen und hydrophoben Aminosäuren das Profil der Lipidhülle widerspiegeln. Zum anderen begünstigen die harschen Versuchsbedingungen solche Vesikel, die von eingelagerten Peptiden stabilisiert werden. Nach rund 1500 Vesikel-»Generationen« führt das zu komplexen Bläschen mit Peptiden, die neue, stabilisierende Funktionen erfüllen. Darunter fällt die Bildung tunnelartiger Strukturen in der Membran, die wasserdurchlässig sind und infolgedessen den osmotischen Druck auf die Vesikelhülle reduzieren. Man kann das als Evolutionsprozess verstehen, der zu mehr Differenzierung hinführt. Die Sequenzen der daran beteiligten Peptide sind sehr vielfältig – was nicht wundert, denn zwölf verschiedene Aminosäuren ergeben schon bei einer Zehnerkette mehr als 60 Milliarden mögliche Sequenzen. In der präbiotischen Evolution mögen sich daher zahlreiche Peptide spontan gebildet haben, doch für die Entstehung lebender Strukturen brauchte es einen Speicher, der ihren Bauplan festhielt, so dass die frühen Organismen sie reproduzierbar herstellen konnten.

Henne oder Ei?

Damit steht eine besonders schwierige Frage im Raum: Wie kam es auf dem Weg zur ersten Zelle dazu, dass die Bauanleitung der Zellbestandteile in der Struktur einer Nucleinsäure codiert und somit als genetische Information an die Nachkommen weitergegeben werden konnte? Als Informationsträger diente dabei zunächst wahrscheinlich die RNA; erst später nahm, vermutlich aus Stabilitätsgründen, die DNA ihren Platz ein. Douglas LaRowe und Pierre Regnier von der Utrecht University haben 2008 in thermodynamischen Analysen gezeigt, dass die Bausteine von Nucleinsäuren – Nucleinbasen sowie die Zucker Ribose und Desoxyribose – unter hydrothermalen Bedingungen aus den Ausgangsstoffen Formaldehyd und Zyanwasserstoff entstehen können. Wir selbst haben experimentell in einem solchen Umfeld bereits die Verknüpfung von Nucleinbasen und Zuckern einerseits, von Zuckern und Phosphaten andererseits beobachtet. Eine vollständige Nucleotidbildung konnten wir allerdings noch nicht nachweisen und müssen daher die Nucleotid- und RNA-Bildung in hydrothermalen Spalten in unserem Modell zunächst voraussetzen. Dass sich RNA-Moleküle unter bestimmten Verhältnissen selbst kopieren und als »Ribozyme« zudem katalytisch aktiv sein können, haben Forscher um den amerikanischen Molekularbiologen Sol Spiegelmann bereits 1967 belegt.

RNA-Moleküle sind bei sauren pH-Werten zwischen 3 und 4, die in den Fluiden in tektonischen Störungszonen üblich sind, besonders stabil. Allerdings neigen ihre Stränge



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH ULRICH SCHREIBER

Schema der hydrothermalen Verhältnisse, wie sie in einer tief hinabreichenden Spalte der Erdkruste vor rund vier Milliarden Jahren existiert haben könnten.

zum »Verklumpen«, sobald Abschnitte mit komplementären Basenabfolgen einander nahekomen. Dadurch bilden sich Doppelstränge und Schleifenstrukturen, was unter anderem den Kopiervorgang behindert. In diesem Fall ist eine Temperatur von mehr als 60 Grad Celsius erforderlich, um die »verklebten« Stränge voneinander zu trennen; erst dann lassen sie sich wieder kopieren.

Hier kommt eine Besonderheit von Geysiren ins Spiel: Jedes Mal, wenn sie oberirdisch ausbrechen, fällt der Druck der Wassersäule in darunter liegenden Gesteinsspalten ab, bis in den Grenzbereich zum überkritischen Gas hinein. Infolgedessen wird dieses über einen Bereich von einigen dutzend Metern hinweg schlagartig unterkritisch, dehnt sich aus und kühlt im Zuge des Joule-Thomson-Effekts ab. Das ist der Moment, in dem sich komplementäre Nucleotide an den RNA-Strang anlagern, wobei Doppelstränge entstehen. Sobald die Geysireruption vorüber ist, läuft Wasser von der Oberfläche in die Spalten zurück, und der Druck in der Tiefe steigt wieder. Das Gas wird komprimiert, erneut überkritisch und heizt sich auf einen Wert auf, der über der Schmelztemperatur der RNA-Doppelstränge liegt. Die Stränge trennen sich voneinander und stehen für einen neuen Zyklus bereit. Tektonische Bruchzonen mit Geysiren sollten somit eine Umgebung schaffen, in der RNA-Stränge



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/entstehung-des-lebens

INSTITUTE FOR EXPLORATION, URI-GSO AND INSTITUTE FOR ARCHAEOLOGICAL OCEANOGRAPHY, URI

beliebig oft kopiert werden, solange ausreichend Bausteine zur Verfügung stehen.

Wenn in den hydrothermalen Spalten der Erdkruste nicht nur Peptide und Vesikel entstanden, sondern auch RNA-Moleküle, könnte eine bestimmte Sorte davon vielleicht einen entscheidenden Anteil an der Entstehung des Lebens gehabt haben – die Transfer-RNAs (tRNAs) beziehungsweise ihre damaligen Vorläufermoleküle. Diese kurzen RNA-Stücke können auf einer Seite eine spezifische Aminosäure ankoppeln und tragen auf der anderen Seite eine Art Barcode, das »Anticodon«: eine Einheit aus drei aufeinander folgenden Nukleinbasen. Sie heftet sich an eine jeweils dazu passende (komplementäre) Nukleotidsequenz auf einem Boten-RNA-Molekül. Das stellt in heutigen Zellen sicher, dass die in der Boten-RNA codierte Information auf eindeutige Weise in eine Aminosäurekette übersetzt wird.

Überhang von Glycin und Alanin

Bisherige Modelle zur Entstehung des Lebens haben einen Punkt weitgehend außer Acht gelassen: Zu Beginn der Entwicklung waren wahrscheinlich nicht alle Aminosäuren gleichermaßen verfügbar, die in heutigen Lebewesen als Bausteine von Proteinen dienen. Vermutlich wurde ihre Mengenverteilung davon bestimmt, wie einfach – und somit wie häufig – sie sich spontan bilden konnten. Die beiden am leichtesten unter hydrothermalen Bedingungen entstehenden Aminosäuren Glycin und Alanin waren wohl die häufigsten, während die anderen seltener vorkamen.

Diese Randbedingung ist wichtig für eine Antwort auf die Frage, wie der RNA-Speicher der Erbinformation entstanden sein könnte und welcher Prozess dafür sorgte, dass die Nukleotidsequenz mit der Aminosäuresequenz von Peptiden und Proteinen verknüpft wurde. Dazu schlagen wir die folgende Hypothese vor.

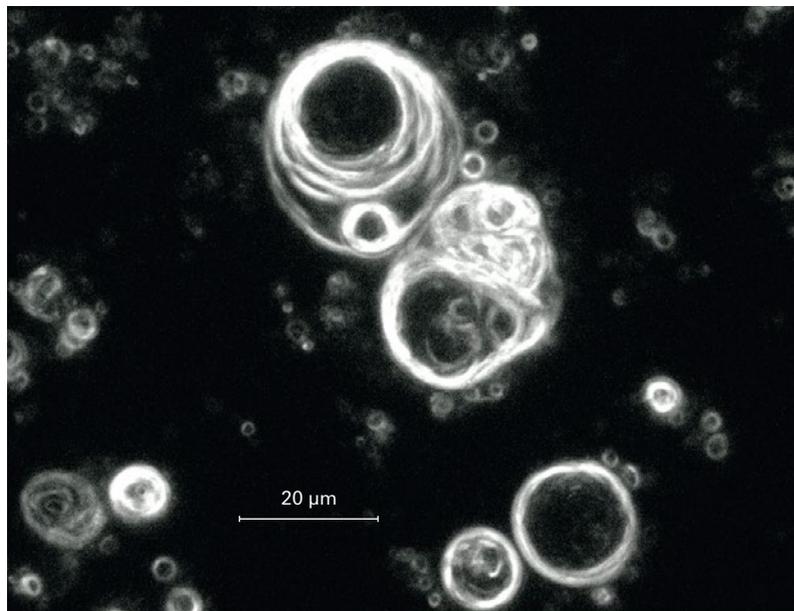
In den bereits erwähnten Experimenten haben wir demonstriert, dass unter den hydrothermalen Bedingungen tektonischer Bruchzonen ständig Peptide und Vesikel entstehen. Zudem liegen dort Verhältnisse vor, unter denen RNA-Moleküle fortlaufend kopiert werden können. Weil damals mutmaßlich ein Überangebot von Glycin und Alanin vorlag, sind wohl hauptsächlich Peptide entstanden, die sich nur aus jenen zwei Aminosäuren zusammensetzten. Diese Peptide bildeten sich in einer Unzahl von Varianten und rein zufallsbedingt. Die meisten von ihnen übten keine Funktion aus, manche aber besaßen zufällig die Eigenschaft, tRNAs mit Aminosäuren zu verbinden – wobei das zunächst völlig wahllos geschah. Die derart beladenen tRNAs sammelten sich in den Gesteinskammern an, wobei ihre hintereinander liegenden Anticodons eine Vorlage bildeten, an der durch Anlagern von Nukleotiden ein dazu komplementärer RNA-Strang entstehen konnte. Zugleich verknüpften sich auf der anderen Seite der tRNAs die daran gebundenen Aminosäuren zu einem Peptidstrang.

Auf diese Weise bildeten sich zahllose Peptide und damit korrespondierende RNA-Stränge, die aber wieder verschwanden, weil es keinen Mechanismus gab, der für ihre Vervielfältigung sorgte. Die Situation könnte sich geändert haben, als Peptidvarianten auftauchten, die Aminosäuren ganz spezifisch nur auf dazu passende tRNAs luden. Für

eine solche enzymatische Aktivität mussten diese Peptide wohl zumindest zwei unterschiedliche Aminosäuresorten enthalten – vermutlich jene, die damals eben am häufigsten waren, also Glycin und Alanin. Um die Peptide anhand der Bauanleitung eines RNA-Strangs und mit Hilfe von tRNAs immer wieder nachzuproduzieren, brauchte es zwei Sorten beladener tRNAs: solche, die Glycin trugen, und solche, die mit Alanin bepackt waren. Entsprechend hätte es auch zweier verschiedener Peptidvarianten bedurft: eine, die Glycin auf passende tRNAs lud, und eine weitere, die das mit Alanin tat. In dem Moment, in dem die Aminosäuresequenz dieser beiden Peptide in einem RNA-Strang festgehalten war, könnte ein sich selbst erhaltender Apparat entstanden sein. Der RNA-Strang lieferte die Bauanleitung für die beiden Peptide, die ihrerseits tRNAs mit Glycin beziehungsweise Alanin beluden und auf diese Weise zwei Sorten von Bausteinen erzeugten, mit deren Hilfe wiederum entlang des RNA-Strangs die Peptide hergestellt wurden und so weiter. Wurde darüber hinaus noch der RNA-Strang kopiert, vervielfältigte sich der Apparat und konnte damit überdauern. Es ist ein hypothetisches Szenario – aber eines, das mit sehr niedriger Komplexität auskommt (zwei Aminosäuren, zwei Peptide, tRNAs und RNA-Strang) und sich noch einfacher kaum vorstellen lässt.

Die Selbstvermehrung des Apparats führte dazu, dass sich von jetzt an sowohl die Peptide als auch der RNA-Strang als auch die beladenen tRNAs vervielfältigten. Andererseits entstanden weiterhin durch zufällige Reihung von mit unterschiedlichen Aminosäuren beladenen tRNAs ständig neue Peptide und korrespondierende RNA-Stränge. Irgendwann tauchte ein drittes Peptid samt zugehörigem RNA-Strang auf, das eine dritte Aminosäure spezifisch auf

Mikroskopaufnahme von Vesikeln, die in Laborexperimenten der Autoren unter hohen Drücken und Temperaturen aus geeigneten Ausgangsstoffen spontan entstehen.



MARIA J. DAVIDA GARVIN, MIT FREIL. GEN. VON ULRICH SCHREIER

Vesikel-Experimente

Flüssigkeitseinschlüsse in archaischen Quarzen lassen vermuten, dass in den hydrothermalen Spalten der frühen Erde eine Mischung aus langkettigen Aminen und Fettsäuren vorlag. Eine solche Mischung lässt sich experimentell jenen Temperaturen und Drücken aussetzen, wie Forscher sie für die damalige obere Erdkruste annehmen. Lässt man den Druck in diesem Umfeld plötzlich abfallen, wechselt überkritisches CO₂ in den gasförmigen Zustand. Das Wasser,

das zuvor im überkritischen CO₂ gelöst war, bildet nun feine Nebeltröpfchen, in denen sich die organischen Moleküle ansammeln, weil sie nicht im Gas verbleiben können. Die Tröpfchen sinken auf die Oberfläche des umgebenden Wasserkörpers, während sich auf ihrer Außenseite hydrophobe Amine und Fettsäuren anlagern. Auch auf dem Wasserkörper bilden Amine und Fettsäuren eine Art Film, und sobald sie Kontakt mit absinkenden Tröpfchen be-

kommen, umschließen sie diese mit einer zweiten Hülle. So können Vesikel mit Lipid-Doppelmembranen entstehen, deren Aufbau einer Zelle ähnelt. Ihr Innenraum weist nur wenig gelöste Salze, aber einen hohen Gehalt an organischen Molekülen auf. Im umgebenden Wasser hingegen sind viele Salze gelöst. Aus diesem Konzentrationsgradienten könnten erste Protozellen die Energie für einen einfachen Metabolismus geschöpft haben.

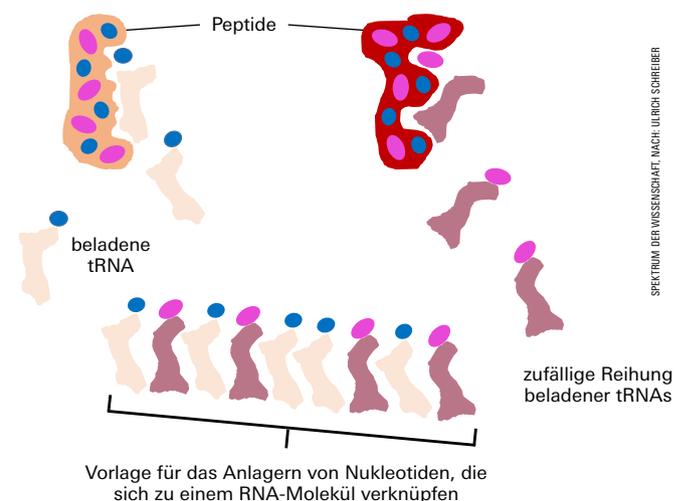
tRNAs lud und fortan an dem sich selbst erhaltenden Molekülensemble mitwirkte. Aus den jetzt drei Aminosäuren, die als Bausteine verfügbar waren, konnte sich mit Hilfe frei kombinierbarer tRNAs ein viertes Peptid herausbilden, das eine vierte Aminosäure spezifisch auf tRNAs lud und so weiter. Diese Entwicklung lässt sich fortschreiben. Ein wichtiger Aspekt des Szenarios ist, dass es mit einem sehr einfachen Zustand startet und dann sukzessive komplexer wird. Zudem entstehen in diesem Modell viele Peptide ohne Funktion, deren Bauplan in RNAs festgehalten wird. Diese Junk-Moleküle könnten sich später infolge kleiner Mutationen in funktionstragende umgewandelt haben.

Heute liegen Aminosäuren und andere Biomoleküle meist nur in einer von zwei möglichen spiegelbildlichen Formen vor – Biochemiker sprechen von links- und rechtshändigen Varianten. Die Entscheidung für eine der beiden ist wohl schon sehr früh in der Evolution gefallen. Unser Modell könnte einen Hinweis darauf liefern, wie das geschah. Alanin ist chiral, das heißt, es gibt sowohl eine links- als auch eine rechtshändige Version. Glycin dagegen

ist nicht komplex genug, um solche Varianten zu bilden, und somit achiral. Links- wie rechtshändige Moleküle sind zunächst wohl gleich oft entstanden, und alle Reaktionen damit haben vermutlich immer mit beiden stattgefunden. Daher bildeten sich zunächst gleich viele Peptide mit links- wie mit rechtshändigem Alanin, allerdings mit je unterschiedlichen Sequenzen. Die Entscheidung für eine von den beiden fiel, als der sich selbst erhaltende Apparat entstand – und zwar für jene Peptidversion, die als Erste eine spezifische Beladung der tRNAs erreicht hatte. Da sie chiral war, führten auch die von ihr katalysierten Reaktionen zu Produkten einer bestimmten Händigkeit, die fortan immer stärker dominierte. Die pH-Werte tief in den tektonischen Störungszonen liegen übrigens genau in dem Bereich, in dem sich bevorzugt Peptide mit nur einer Händigkeit bilden, wie Grégoire Danger von der Universität d'Aix Marseille und seine Kollegen 2012 gezeigt haben.

Wie wir im Labor demonstriert haben, bilden sich unter den hydrothermalen Bedingungen tektonischer Bruchzonen spontan Vesikel, die ein breites Spektrum verschiedener

Welcher Mechanismus sorgte in der frühen Evolution dafür, dass die Aminosäuresequenz von Peptiden mit der Nukleotidsequenz von Nukleinsäuren verknüpft wurde? Möglicherweise spielten hier Transfer-RNAs (tRNAs) beziehungsweise ihre damaligen Vorläufermoleküle eine Rolle. Wenn sie mit Aminosäuren (blaue und pinke Punkte) beladen und hintereinander aufgereiht waren, könnten sich auf der einen Seite die Aminosäuren zu einem Peptidstrang verknüpft haben, während ihre Anticodons auf der anderen Seite eine Vorlage bildeten, an der ein dazu komplementärer RNA-Strang entstehen konnte. Hätte dieser Prozess Peptide hervorgebracht, die zufällig die Eigenschaft hatten, tRNAs mit genau jenen Aminosäuren zu beladen, aus denen sie selbst bestanden (oben im Bild), könnte das einen sich selbst erhaltenden Molekülapparat hervorgebracht haben.



PHARMAZIE IMPfstOFFSUCHE IM SCHNELLGANG

Bei der Entwicklung von Vakzinen gegen Covid-19 setzen immer mehr Firmen auf genbasierte Verfahren.



Covid-19-
PANDEMIE

KOTO, FEJA / GETTY IMAGES / ISTOCK;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Als chinesische Wissenschaftler am 10. Januar 2020 das Erbgut eines mysteriösen, sich rapide ausbreitenden Virus veröffentlichten, bestätigte dies Dan Barouchs größte Sorge: Das Genom ähnelte dem des Coronavirus, das 2003 den Sars-Ausbruch (Severe Acute Respiratory Syndrome) verursacht hatte, wies aber auch markante Unterschiede auf. »Mir war sofort klar, dass niemand dagegen immun sein würde«, erzählt der Direktor des Center for Virology and Vaccine Research am Beth Israel Deaconess Medical Center in Boston (USA).

Binnen weniger Tage begannen sein Labor ebenso wie dutzende andere auf der ganzen Welt mit der Suche nach Impfstoffen, um damit Milliarden von Menschen vor dem Virus Sars-CoV-2 zu schützen – der größten Herausforderung für die globale Gesundheit und den Wohlstand seit Ende des Zweiten Weltkriegs. Bis April 2020 waren es schon etwa 80 Unternehmen und Institute in 19 Ländern, die daran forschten. Statt auf traditionelle Vakzine, wie sie sich etwa bei der Grippe seit mehr als 70 Jahren bewähren, setzen die meisten Labore jetzt auf Gentechnik. Wie die Wissenschaftler hoffen, könnte ein erster Impfstoff bereits Anfang 2021 verfügbar sein – was unglaublich schnell wäre angesichts der Tatsache, dass es normalerweise Jahre bis Jahrzehnte dauert, bis ein Vakzin gegen einen neu aufgetretenen Erreger entwickelt und einsatzfähig ist. Selbst der im Eiltempo geschaffene Ebola-Impfstoff brauchte fünf Jahre, um alle Studien zu durchlaufen. Falls es den Forschern gelingen sollte, in einem Jahr ein sicheres und wirksames Mittel anzubieten, wäre das nach Barouchs Ansicht »die schnellste Impfstoffentwicklung der Geschichte«.

Doch die Betonung liegt auf dem Wörtchen »falls«. Obwohl bereits

mehrere genbasierte Substanzen gegen andere Viren entwickelt worden sind, ist bislang kein einziger für Menschen zugelassen.

Ein konventioneller Impfstoff besteht aus dem abgeschwächten Krankheitserreger oder Teilen von ihm (siehe »Entwicklung eines Impfstoffs gegen Viruserkrankungen«, rechts). Wird er in den Körper injiziert, erkennt das Immunsystem die viralen Moleküle und bildet gegen diese »Antigene« Antikörper, die den Erreger überall im Körper finden und neutralisieren können. Nach dieser Sensibilisierung behalten so genannte Gedächtniszellen des Immunsystems das Wissen, wie sich die Eindringlinge vernichten lassen, um so zukünftige Infektionen zu stoppen.

Bei einem neuen Erreger dauert die Impfstoffentwicklung viel zu lange

Dabei werden geschwächte Viren in der Regel in Hühnereiern – oder neuerdings auch in Säugetier- oder Insektenzellen – gezüchtet und die gewünschten Stücke daraus extrahiert. Es dauert mitunter vier bis sechs Monate, um so die richtigen viralen Antigene zu erhalten, die sich etwa bei der Grippe jedes Jahr verändern. Bei einem neu aufgetretenen Erreger können so durch zahlreiche Versuche mehrere Jahre ins Land ziehen – viel zu lange für einen Virusausbruch, der bereits pandemische Ausmaße angenommen hat.

Bei genbasierten Impfstoffen nutzen Forscher das Virusgenom, um einen Bauplan ausgewählter Antigene zu erstellen. Dazu injizieren sie virale DNA- oder RNA-Moleküle in menschliche Zellen, welche die genetische Information verwenden, um Virusantigene herzustellen, auf die wiederum das Immunsystem reagieren kann. Der Vorgang gleicht einer natürlichen Infektion: Da Viren sich nicht selbst

reproduzieren können, kapern sie die Maschinerie einer Zelle, die daraufhin neue Erreger produzieren.

Praktisch alle Labore setzen bei der Impfstoffsuche gegen Sars-CoV-2 auf das so genannte Spike-Protein als Antigen. Wie ein Stachel ragt es von der Oberfläche des Coronavirus heraus und ermöglicht es dem Erreger, an eine menschliche Zelle anzudocken und in sie einzudringen. Es gibt drei Methoden, um ein Spike-Antigen zu entwerfen. Der erste Ansatz funktioniert über DNA-Plasmide. Diese kleinen, ringförmigen Moleküle haben sich in der Mikrobiologie schon lange als probates Hilfsmittel für den Austausch genetischer Informationen bewährt. Veterinärmedizinisch werden DNA-Plasmid-Impfstoffe bei Hunden, Schweinen oder Pferden eingesetzt, doch beim Menschen verzögerte sich bisher die Anwendung. Meist scheitert der Ansatz daran, dass die Vakzine nur schwer die schützende Zellmembran überwinden können, um so ihr Ziel im Innern zu erreichen. Neuerdings versuchen Forscher, mittels Elektroporation, also mit kurzen Stromstößen, Poren in der Zellmembran zu erzeugen, durch die der Impfstoff eindringen kann.

Das US-amerikanische Pharmaunternehmen Inovio begann vor einigen Jahren mit klinischen Studien für einen DNA-Plasmid-Impfstoff, der vor einem anderen Coronavirus – dem Erreger von Mers (Middle East Respiratory Syndrome) – schützen soll. Laut dem Vorstandsvorsitzenden Joseph Kim sind die Antikörperspiegel bei geimpften Personen »genauso gut oder besser als bei denjenigen, die sich (natürlich) von Mers erholt haben«. Die Firma will nun basierend auf diesem Plasmid einen Impfstoff gegen Sars-CoV-2 herstellen.

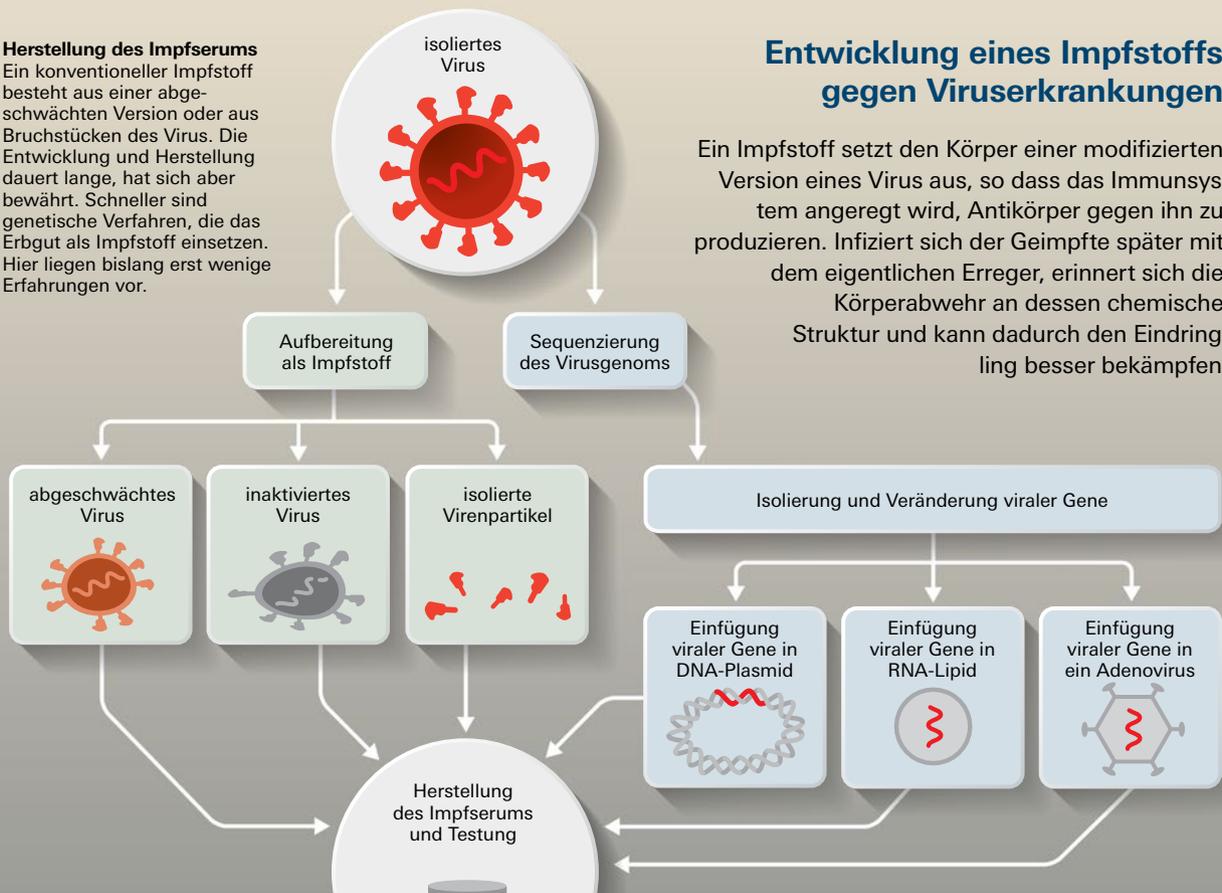
Bei DNA-Plasmid-Impfstoffen überträgt die Zelle den genetischen

Herstellung des Impferserums

Ein konventioneller Impfstoff besteht aus einer abgeschwächten Version oder aus Bruchstücken des Virus. Die Entwicklung und Herstellung dauert lange, hat sich aber bewährt. Schneller sind genetische Verfahren, die das Erbgut als Impfstoff einsetzen. Hier liegen bislang erst wenige Erfahrungen vor.

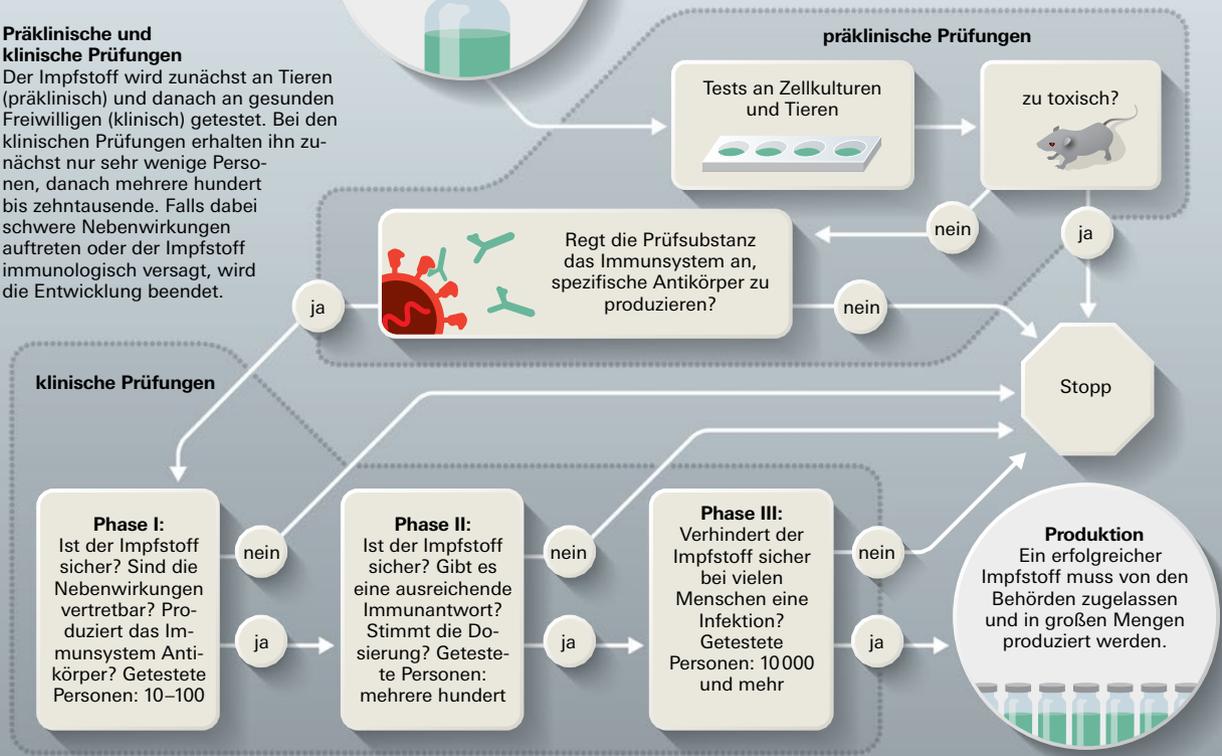
Entwicklung eines Impfstoffs gegen Viruserkrankungen

Ein Impfstoff setzt den Körper einer modifizierten Version eines Virus aus, so dass das Immunsystem angeregt wird, Antikörper gegen ihn zu produzieren. Infiziert sich der Geimpfte später mit dem eigentlichen Erreger, erinnert sich die Körperabwehr an dessen chemische Struktur und kann dadurch den Eindringling besser bekämpfen.



Präklinische und klinische Prüfungen

Der Impfstoff wird zunächst an Tieren (präklinisch) und danach an gesunden Freiwilligen (klinisch) getestet. Bei den klinischen Prüfungen erhalten ihn zunächst nur sehr wenige Personen, danach mehrere hundert bis zehntausende. Falls dabei schwere Nebenwirkungen auftreten oder der Impfstoff immunologisch versagt, wird die Entwicklung beendet.



Bauplan auf zelluläre RNA, mit denen sie wiederum die Spike-Antigene herstellt. Dieser Schritt lässt sich jedoch überspringen, wenn man den Bauplan direkt als RNA liefert – der zweite Ansatz für genetische Impfstoffe. Dabei packen die Wissenschaftler die RNA in Lipide – Fettmoleküle, die leicht die Zellmembran passieren können – und injizieren das Ganze in den Körper. Wie bisherige Forschungsergebnisse zeigen, können solche RNA-Impfstoffe das Immunsystem möglicherweise intensiver als DNA-Plasmide zur Antikörperbildung mobilisieren. Da sie auch eine stärkere Immunität, also ein besseres Immungedächtnis zu erzeugen scheinen, benötigt man vergleichsweise geringere Dosen. Bei anderen Viruserkrankungen wie Tollwut, Aids oder Zika fanden bereits erste klinische Studien mit RNA-Impfstoffen statt. Die US-amerikanische Biotechnologiefirma Moderna, das in Mainz ansässige Unternehmen BioNTech sowie die Tübinger Firma CureVac verwenden diesen Ansatz für Sars-CoV-2 (siehe hierzu das Interview in »Spektrum« Juni 2020, S. 25).

Sars-CoV-2 scheint nicht so schnell zu mutieren wie das Grippevirus

Allerdings erweist sich RNA als weniger stabil als DNA-Plasmide und wird im Körper durch normale Enzyme schnell abgebaut. Da ihnen im Gegensatz zu DNA-Plasmid-Impfstoffen Wärme stärker zusetzt, müssen RNA-Impfstoffe tiefgefroren oder zumindest gekühlt aufbewahrt werden, was vor allem in ärmeren Ländern logistische Probleme machen dürfte.

Zusammen mit dem US-Pharmakonzern Johnson & Johnson verfolgt Dan Barouch und sein Team einen dritten Ansatz: Sie nutzen ein gewöhnliches Erkältungsvirus als Transportvehikel für den DNA-Bauplan. Nach Injektion infiziert dieser adenovirale

Vektor menschliche Zellen und baut dadurch die fremde DNA ein. Adenoviren können zwar leicht in Zellen eindringen, allerdings werden einige von ihnen schnell vom menschlichen Immunsystem erkannt und attackiert. Barouch verwendet daher einen Virustyp, der sich nach bisherigen Erkenntnissen besser am Abwehrsystem vorbeischieben kann. Da manche Experten befürchten, dass sich das Adenovirus im Körper vermehren und Krankheiten verursachen könnte, kreierte Barouchs Team ein künstliches Virus, das keine Kopien von sich selbst herstellen kann, da es hierfür eine Substanz benötigt, die im menschlichen Körper fehlt.

Testen, testen, testen

Hat sich die grundlegende Funktionalität eines Impfstoffs in Laborkulturen bestätigt, wird er an Tieren getestet, um festzustellen, ob er eine Immunantwort auslöst. Als Nächstes folgt der Test an Menschen: zuerst in kleinen Gruppen, um Sicherheit und Nebenwirkungen zu überprüfen, dann in immer größeren, um zu sehen, wie gut er wirkt. Inovio testet sein DNA-Plasmid bereits seit dem 6. April 2020, nur drei Monate nach der Veröffentlichung des Sars-CoV-2-Genoms, in kleinem Maßstab an menschlichen Probanden. Moderna begann sogar schon am 16. März mit ersten Studien am Menschen für seinen RNA-Impfstoff. Und am 22. April genehmigte das in Deutschland zuständige Paul-Ehrlich-Institut BioNTech, erste klinische Studien mit etwa 200 gesunden Erwachsenen durchzuführen, die RNA als Corona-Impfstoff erhalten.

Auch wenn seit dem Ausbruch der Corona-Epidemie viel weniger Zeit bis zum Beginn der klinischen Tests verstrichen ist als bei herkömmlichen Impfstoffen, ist keineswegs garantiert, dass die weiteren Studien mit gentechnisch hergestellten Vakzinen nicht ebenfalls Jahre in Anspruch nehmen werden. Glücklicherweise scheint Sars-CoV-2 nicht so schnell zu mutieren wie das Grippevirus, so dass ein wirksamer Impfstoff, wenn er erst einmal entwickelt ist, für lange Zeit Schutz bieten könnte.

Die neu entwickelten Vakzine können jedoch auch eine Schattenseite bergen: das Antibody Dependent Enhancement. Demnach besteht die Gefahr, dass ein Impfstoff die Symptome von Covid-19, der von Sars-CoV-2 verursachten Krankheit, unbeabsichtigt verschlimmern könnte. So traten bei Frettchen, denen 2004 ein experimenteller Sars-Impfstoff verabreicht wurde, gefährliche Entzündungen auf. Allerdings ließ sich laut Joseph Kim von Inovio bei Menschen, die mit dem Impfstoff behandelt wurden, keine solche Krankheitsverstärkung beobachten. Doch die Substanz wurde nie an größeren Probandenzahlen getestet, weil der Sars-Ausbruch – bei dem etwa 8000 Menschen in fast 30 Ländern erkrankten – nach einem Jahr verebbte.

Die Firmen beschleunigen die Entwicklungszeit für einen Sars-CoV-2-Impfstoff, indem sie ihre Substanzen an mehreren Tierarten gleichzeitig sowie parallel an einer kleinen Zahl menschlicher Probanden testen. Gewöhnlich erfolgen solche Studien nacheinander, um sicherzustellen, dass nur wenige Nebenwirkungen auftreten und dass das Immunsystem wirksam anspringt. Doch der Zeitdruck rechtfertigt ein höheres Risiko.

Um die Welt vor Covid-19 zu schützen, bedarf es enormer Produktionskapazitäten. Die DNA-Plasmid- und RNA-Impfstoffe wurden noch nie in einer Stückzahl von Millionen Dosen hergestellt, und kleinere Firmen besitzen solche Kapazitäten überhaupt nicht. Laut Barouch verläuft die Entwicklung genbasierter Impfstoffe zwar zunächst zeitaufwändig, die Produktion lasse sich aber dann »schnell hochskalieren«.

Nach Ansicht der Virologin Brenda Hogue von der Arizona State University gilt derzeit noch kein Prototyp eines Impfstoffs als klarer Favorit. Aber die Schnelligkeit der genetischen Forschung und das Engagement der Firmen ermutigen sie: »Ich bin sehr optimistisch.«

Charles Schmidt ist Wissenschaftsjournalist in Portland (USA) und schreibt hauptsächlich über Themen zu Gesundheit und Umwelt.

MOLEKULARBIOLOGIE

DURCHBRUCH BEI DER VORHERSAGE VON PROTEINSTRUKTUREN

Biochemiker träumen seit Jahrzehnten davon, die genaue dreidimensionale Struktur eines Proteins aus der Aminosäuresequenz ablesen zu können. Mit Hilfe von selbstlernenden Algorithmen sind sie diesem Ziel nun deutlich näher gekommen.

► Für fast alle chemischen und mechanischen Prozesse in Zellen sind Proteine verantwortlich. Sie bestehen aus Aminosäureresten, die lange Ketten bilden, und falten sich spontan zu dreidimensionalen Strukturen. Die Abfolge der Aminosäuren legt die genaue Form und den Bewegungsumfang eines Proteins fest, was wiederum seine Funktion bestimmt. Biologen haben über Jahrzehnte Tausende dieser Strukturen experimentell untersucht, was allerdings extrem aufwändig ist. Daher wandten sich einige von ihnen anderen Methoden zu, um herauszufinden, welche Form ein Protein annehmen dürfte. Andrew Senior vom Technologieunternehmen DeepMind und seine Kollegen haben nun den Algorithmus AlphaFold entwickelt, der das Problem durch KI angeht – und bereits zu großen Fortschritten geführt hat.

Wegen der zahlreichen möglichen dreidimensionalen Strukturen, die ein Protein bilden kann, lassen sich keine einfachen Faltungsregeln herleiten. Das macht es so schwer vorherzusagen, wie eine Aminosäuresequenz als Protein aussehen wird. Letztlich legt die Quantenmechanik die genaue Proteinstruktur fest. Liefße sich die exakte Energie für jede mögliche Form berechnen, müsste man bloß noch die energetisch günstigste Konformation herausuchen. Allerdings hat jedes Protein enorm viele verschiedene Faltungsmöglichkeiten, was eine solche quantenmechanische Herangehensweise eigentlich ausschließt.

Das hat Forscher aber nicht davon abgehalten, es trotzdem zu versuchen.

Welche dreidimensionale Struktur wird ein bestimmtes Protein annehmen? KI könnte dabei helfen, diese knifflige Frage zu beantworten.

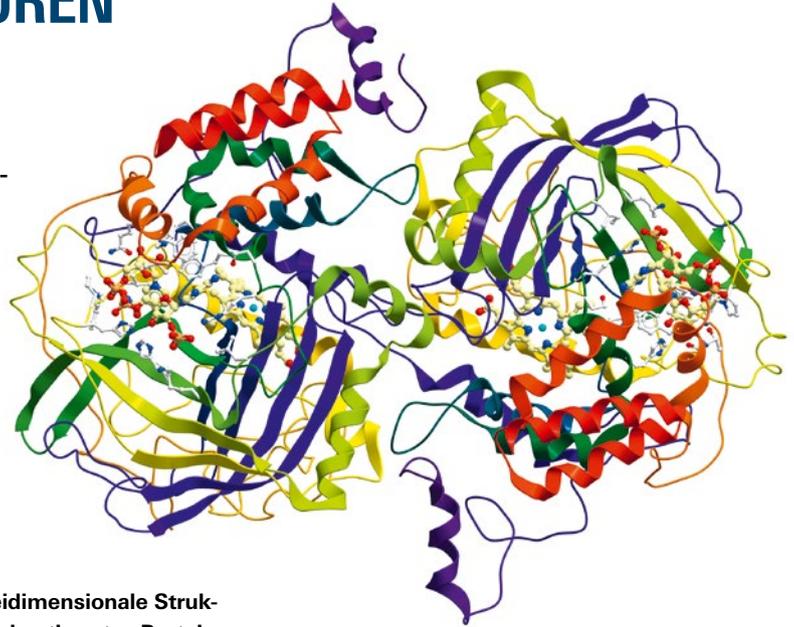
Physikalische Chemiker entwickelten Näherungsverfahren, um die Energien der Proteine abzuschätzen, und Informatiker entwarfen Algorithmen, mit denen sie verschiedene Konformationen untersuchen. Der erste Ansatz erwies sich zunächst als erfolgreich; die Wissenschaftler erzielten damit viele Fortschritte auf dem Gebiet. Bei der zweiten Methode stießen sie hingegen auf einige Probleme.

Abenteuerliche Proteinlandschaft

Die möglichen Formen eines Proteins lassen sich mit einer Landschaft vergleichen: Jeder Ort steht darin für eine bestimmte Struktur, wobei nahe gelegene Positionen ähnlichen Faltungen entsprechen. Die Höhe eines Standorts stellt die Energie einer Konformation dar, das heißt der tiefste Punkt ist der energetisch günstigste. Natürliche Proteine bilden trichterförmige Landschaften. Wärmeschwankungen in der Zelle bringen neu synthetisierte Proteine dazu, diese Land-

schaft zu durchqueren und innerhalb von Millisekunden bis Minuten eine bevorzugte Struktur anzunehmen. Indem Algorithmen solche Landschaften nach einem Minimum absuchen, können sie diesen Prozess vorhersagen. Allerdings führen die zahlreichen Unebenheiten dazu, dass die Programme häufig weit entfernt vom tiefsten Punkt in etwas flacheren Tälern stecken bleiben, wodurch sie falsche Ergebnisse liefern.

Vor fast zehn Jahren erschienen mehrere bahnbrechende Arbeiten, die das Forschungsfeld umkrempelten. Darin wurde untersucht, inwiefern evolutionäre Prozesse Hinweise auf die Gestalt eines Proteins enthalten. Ihre Grundidee ist folgende: Befinden sich in einem bereits gefalteten Protein zwei Aminosäurereste nahe beieinander und eine Mutation ersetzt einen davon durch einen anderen Rest (etwa groß durch klein), dann erhöht das die Wahrscheinlichkeit, dass nach einer gewissen Zeit der andere Rest entgegengesetzt mutiert (in diesem Beispiel: klein zu groß) und so die Änderung kompensiert. Bestimmt man derartige »koevolutionäre« Veränderungen,



LEONID ANDRINOV / GETTY IMAGES / ISTOCK

erfährt man etwas über die Proteinstruktur, nämlich dass die betroffenen Aminosäuren nahe beieinanderliegen. Deswegen fingen die Forscher an, in miteinander verwandten Proteinen nach derart evolutionär zusammenhängenden Sequenzen zu suchen.

Diese Informationen lassen sich durch eine Matrix darstellen, eine so genannte binäre Kontaktkarte. Sie beschreibt, welche Aminosäurereste in einer Proteinstruktur benachbart sind, was die Menge der möglichen Konformationen erheblich einschränkt. Damit lassen sich energetisch günstige Proteinfaltungen vorhersagen, insbesondere wenn man viele evolutionär zusammenhängende Sequenzen kennt. Der zu Grunde liegende Gedanke dieser Methode ist nicht neu. Doch Anfang 2010 nahmen die verfügbaren Daten zu koevolutionären Aminosäureresten rasch zu, und gleichzeitig erzielten Informatiker entscheidende algorithmische Durchbrüche, weshalb die Biochemiker das Forschungsgebiet in dieser Zeit rasch voranbrachten.

Dabei sind sie weiterhin auf Computerprogramme angewiesen, um die Energielandschaften der Proteine zu durchleuchten. Denn binäre Kontaktkarten schränken den Suchraum zwar ein, sagen aber noch keine konkreten dreidimensionalen Strukturen voraus. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich, wenn man koevolutionäre Informationen in Kontaktkarten umwandelt. Denn die Wissenschaftler sind dabei durch die Art der verwendeten Eingabedaten und der erzeugten Ausgaben eingeschränkt. Deep Learning, eine bestimmte Art maschinellen Lernens, verbessert diesen Prozess, indem es vielfältige Inputdaten zulässt. AlphaFold nutzt dies, geht aber noch einen Schritt weiter und liefert andere Ausgabeinformationen.

Der neue Algorithmus von DeepMind gibt nämlich nicht wie bisher üblich binäre Kontaktdaten aus, sondern berechnet direkt die Wahrscheinlichkeit, dass Aminosäurereste durch eine bestimmte Distanz voneinander getrennt sind. Da diese Wahrscheinlichkeiten mit den Energien der Proteinstruktur zusammenhängen, führen die Ergebnisse von AlphaFold direkt zu

einer Landschaft. Diese überschneidet sich in ihrem tiefsten Punkt mit der echten, verläuft aber viel glatter als das Original. Tatsächlich ist die Version von AlphaFold so glatt, dass sich das Minimum schnell finden lässt. Statt komplexer Suchalgorithmen benötigt man bloß noch vergleichsweise einfache Verfahren, um die günstigste Konformation zu bestimmen.

AlphaFold übertrifft alle bisherigen Methoden

Dass man bei der Strukturvorhersage nicht zwingend auf komplizierte Suchstrategien zurückgreifen muss, ist letztlich wenig überraschend. Denn kennt man die Abstände zwischen den Aminosäureresten, legt das ihre relative Position im Raum fest, wovon wiederum die dreidimensionale Form des Moleküls abhängt. In manchen Fällen ließen sich bereits beispielsweise relativ einfache Modelle von Proteinlandschaften nutzen, so genannte Gö-Potenziale, um die möglichen Faltungen vorherzusagen. Diese Modelle berücksichtigen experimentell gemessene Abstände zwischen Aminosäureresten. Ihre Modelle legen nahe, dass sich Proteine eher wie einfaches Origami als wie komplizierte Knoten falten – alle Teile können dabei gleichzeitig entsprechend zusammenkommen, um die dreidimensionale Struktur zu bilden. Zudem zeigte ich bereits 2019, dass einige Deep-Learning-Algorithmen ganz ohne aufwändige Suche die Form von Proteinen vorhersagen können. Andere Forscher haben ähnliche Programme mit minimalen Suchverfahren entwickelt.

Die Besonderheit von AlphaFold besteht darin, dass es die Entfernungen zwischen Aminosäureresten präziser vorhersagt, als selbst modernste Suchmethoden es zu leisten vermögen. Senior und seine Kollegen nutzten dazu aktuelle Fortschritte beim Deep Learning, um so viel Information wie möglich aus den Proteinsequenzen zu extrahieren. Ihr Algorithmus übertraf alle Teilnehmer von CASP13 (Critical Assessment of Techniques for Protein Structure Prediction), einem Wettbewerb der University of California in Davis, der

verschiedene Methoden zur Strukturvorhersage beurteilt. AlphaFold fand für 25 von 43 Proteinen die energetisch günstigste Konformation – das nächstbeste Programm schaffte das bei lediglich drei aus 43. Die Ergebnisse von AlphaFold hatten eine mittlere Genauigkeit von $6,6 \cdot 10^{-10}$ Meter bei den Testobjekten. Das heißt, die Atome waren in den berechneten Proteinstrukturen nur durchschnittlich 0,66 Nanometer von ihren tatsächlichen Positionen entfernt.

Es bleiben viele Herausforderungen bestehen. Für die meisten Anwendungen ist AlphaFold nicht genau genug, etwa um katalytische Mechanismen von Enzymen oder die Bindung von Medikamenten an Proteinen zu erklären (beides benötigt typischerweise eine Genauigkeit von 0,2 bis 0,3 Nanometer). Und obwohl das Suchverfahren von AlphaFold viel einfacher ist als die der meisten anderen Algorithmen, dauert es dennoch dutzende bis hunderte Stunden, bis es eine einzige Vorhersage liefert. Für Bereiche wie das Proteinsign, bei dem man die Strukturen vieler verschiedener Sequenzen modellieren muss, stellt das ein Hindernis dar.

Trotzdem markiert diese Arbeit einen Wendepunkt für das Forschungsfeld. Angesichts der ständig wachsenden Anzahl an verfügbaren Proteinsequenzen könnte man in den nächsten fünf Jahren die groben Strukturen (etwa mit 0,4 Nanometer Auflösung) der meisten Proteine bestimmen, die aus einer einzigen gefalteten Domäne bestehen. Das würde die Lebenswissenschaften nachhaltig ähnlich verändern, wie es die zunehmenden Sequenzinformationen in den letzten Jahrzehnten getan haben. Beachtet man zusätzlich die rasanten Fortschritte in der Kryoelektronenmikroskopie, könnte das ein goldenes Zeitalter der Strukturbiologie einleiten.

Mohammed AlQuraishi ist Biologe am Laboratory of Systems Pharmacology an der Harvard Medical School in Boston.

QUELLEN

AlQuraishi, M.: End-to-end differentiable learning of protein structure. *Cell Systems* 8, 2019

Senior, A.W. et al.: Improved protein structure prediction using potentials from deep learning. *Nature* 577, 2020

ASTROPHYSIK

VIELE WEGE FÜHREN ZUR EXPLOSION

Ein wichtiger Typ von Supernova scheint in den meisten Fällen anders abzulaufen als lange gedacht.

► Vor zwei Jahrzehnten schien alles noch ganz einfach: Supernovae vom Typ Ia gehen auf Weiße Zwerge zurück, die Materie von einem großen Begleitstern aufsaugen; das lernte man damals als Student in Astrophysik-Seminaren. Bei Erreichen einer bestimmten Masse explodieren sie dann mit stets gleicher Strahlkraft, hieß es. Daher galten sie als »Standardkerzen«, mit denen sich Entfernungen zu weit entfernten Galaxien bestimmen lassen.

So ähnlich dürften viele es noch immer im Kopf haben. Dabei ist für Experten mittlerweile klar, dass die Sache komplizierter ist: Astrophysiker unterscheiden mehrere Szenarien, die zu Supernovae vom Typ Ia führen können. Zwar ist bei allen ein Weißer Zwerg beteiligt. Aber wie genau es zum Kollaps und anschließend zur Supernova kommt, ist von Fall zu Fall verschieden. Eine neue Studie bringt

nun Bewegung in dieses Forschungsfeld: Ein Team um Maria Bergemann und Philipp Eitner vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg hat rekonstruiert, welche Prozesse vergangenen Supernova-Explosionen in unserer Galaxie zu Grunde lagen. Demnach läuft nur ein kleiner Teil der Ia-Supernovae nach dem klassischen Schema ab, bei dem ein Weißer Zwerg einem Nachbarstern nach und nach Materie klaut.

Ein Weißer Zwerg ist eine ausgebrannte Sonne. Er entsteht, wenn ein Stern allen Wasserstoff und sämtliches Helium zu Kohlenstoff und Sauerstoff verschmolzen hat. Auf dem Weg dorthin bläht er sich erst zu einem Roten Riesen auf. Dann fällt er zu einer kompakten Kugel von der Größe der Erde zusammen.

In einem Weißen Zwerg wehren sich die Elektronen dagegen, weiter zusammengedrückt zu werden. Ein

aus der Quantenphysik herrührender »Entartungsdruck« macht das möglich. Jenseits von 1,4 Sonnenmassen wird die Schwerkraft jedoch zu stark, als dass sich der Weiße Zwerg weiter dagegenstemmen könnte. Es folgt ein plötzlicher Kollaps, der enorme Mengen Energie freisetzt – eine Supernova vom Typ Ia.

Jenseits der Chandrasekhar-Masse

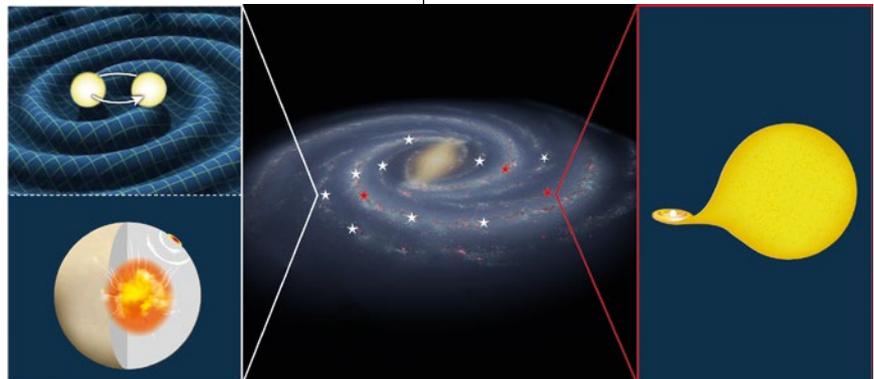
Die Massengrenze für Weiße Zwerge geht auf den indischen Physiker Subrahmanyan Chandrasekhar zurück. Er hatte die nach ihm benannte Chandrasekhar-Masse bereits in den 1930er Jahren berechnet. Sie verleiht Supernovae, die auf einen Weißen Zwerg zurückgehen, eine besondere Bedeutung: Da hier stets eine gleich große Masse in sich zusammenfällt, sollte die Supernova jeweils gleich viel Strahlung ins All feuern. Aus ihrer Helligkeit am Nachthimmel kann man also auf ihre Distanz zu uns schließen – je dunkler eine solche Supernova erscheint, desto weiter entfernt hat sie stattgefunden. Andere Strahlungsquellen lassen solch einen Schluss nicht zu. Bei ihnen weiß man schlicht nicht, ob sie sehr weit weg oder ziemlich leuchtschwach sind.

Entsprechend haben Ia-Supernovae eine große Bedeutung für die Kosmologie. Forscher können mit ihrer Hilfe ermitteln, wie schnell sich das Univer-

Szenarien für Ia-Supernovae

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie ein Weißer Zwerg eine Supernova vom Typ Ia herbeiführen kann: Das klassische Szenario sieht vor, dass die Sternleiche nach und nach Materie eines größeren Begleitsterns absaugt (rechts). Denkbar sind aber auch zwei Weiße Zwerge, die sich immer näher kommen und dann schließlich verschmelzen (links oben). Möglichkeit Nummer drei: Der Massentransfer von einem Begleiter findet nur sehr langsam statt, so dass es zu einer vorzeitigen Explosion auf der Oberfläche des Zwergs kommt, die dann ebenfalls eine Supernova lostritt (links unten). Mit Hilfe des Ele-

ments Mangan können Astrophysiker rekonstruieren, welches der Szenarien für vergangene Supernovae in unserer Milchstraße verantwortlich war (Mitte).



R. HIRT/TECH-JPL, KOMPOSITION: MPA/GRAFIKARBEITUNG, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

sum bisher ausgedehnt hat. Die Explosionen haben damit unter anderem zur Entdeckung der Dunklen Energie geführt, die die kosmische Expansion nach Einschätzung der meisten Fachleute immer weiter beschleunigt (siehe »Spektrum« Mai 2020, S. 12).

Im Detail sind Supernovae vom Typ Ia jedoch deutlich komplizierter, als man auf den ersten Blick vermuten würde. So ist keinesfalls gesagt, dass sich ein Weißer Zwerg stets langsam auf die Chandrasekhar-Masse zubewegt. So wäre es nur bei einem Exemplar, das gemächlich Materie eines größeren Nachbarsterns absaugt.

Im All gibt es jedoch auch ganz andere Paarungen. Etwa zwei Weiße Zwerge, die plötzlich miteinander verschmelzen, dabei schlagartig eine viel größere Masse zusammenbringen und in einer deutlich heftigeren Supernova explodieren. Andererseits können Weiße Zwerge ebenso unterhalb der Chandrasekhar-Massengrenze vergehen, wie Theoretiker bereits in den 1980er Jahren erkannt haben. Saugen die Sternleichen beispielsweise nur sehr langsam Masse von einem Nachbarn auf, kann sich an der Oberfläche des Zwergs Helium sammeln und dort eine kleinere Explosion zünden. Diese stößt dann eine Art vorzeitige Supernova mit geringerer Leuchtkraft an.

Aber wie häufig sind solche Abläufe, die vom klassischen Szenario abweichen? Leider ereignen sich die meisten der Explosionen in so großer Entfernung, dass sie erst sichtbar werden, wenn die Explosion längst in vollem Gange und die ursprüngliche Konstellation nicht mehr sichtbar ist. Eine der nächstgelegenen Typ-Ia-Supernovae leuchtete beispielsweise 2011 in einer 21 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie auf, was für kosmologische Maßstäbe der erweiterten Nachbarschaft entspricht. Trotzdem gelang es Forschern nicht, anhand alter Teleskopbilder das ursprüngliche Aussehen des Systems zu ermitteln.

Astrophysiker suchen daher schon länger mit indirekten Methoden nach einer Antwort. Eine Möglichkeit sind die Überreste vergangener Typ-Ia-Supernovae: Die expandierenden Materiewolken senden Strahlung mit cha-

rakteristischen Signaturen aus, die einen Rückschluss auf die chemische Zusammensetzung und die Expansionsgeschwindigkeit des Trümmerfelds erlauben. Mit diesen Informationen kann man dann die Masse des Ursprungssystems eingrenzen.

Derartige Untersuchungen liefern schon seit längerem Indizien für unterschiedliche Abläufe von Typ-Ia-Explosionen. Leider finden sich in unserer näheren galaktischen Umgebung bloß wenige geeignete Supernova-Überreste. Die Heidelberger Astrophysiker um Bergemann und Eitner gingen daher nun einen anderen Weg. Sie suchten nach schweren chemischen Elementen, die nur in Sternexplosionen entstehen.

Mit Mangan in die Vergangenheit der Milchstraße

Eine besondere Bedeutung spielt dabei das Element Mangan. Modellrechnungen zufolge bildet es sich nur in zwei Arten von Sternexplosionen in größerer Menge: bei der Explosion von Weißen Sternen mit der Chandrasekhar-Masse und bei Supernovae des Typs II, bei denen ein einzelner Riesenstern kollabiert. In Ia-Supernovae unterhalb der Chandrasekhar-Masse entstehen hingegen nicht genügend Neutronen, die leichtere Atomkerne einfangen müssen, um sich in das Element Mangan zu verwandeln.

Die Astrophysiker untersuchten deshalb, wie viel Mangan es in 42 Sternen in unserer Milchstraße gibt, in denen sich zwangsläufig das Material lang zurückliegender Supernovae ballt. Das Ergebnis: Die Sonnen enthalten überraschend wenig Mangan. Es sollte daher deutlich seltener Supernova-Explosionen nach dem klassischen Szenario gegeben haben als gedacht. Ganze 75 Prozent aller Typ-Ia-Explosionen könnten sich dagegen unterhalb der Chandrasekhar-Masse ereignet haben, schätzen die Forscher. Bisher gingen Experten von 50 Prozent aus.

Die ermittelte Häufigkeit scheint unabhängig davon zu gelten, wie alt die untersuchten Sterne waren. Das Team schließt daraus, dass die »Sub-Chandrasekhar«-Supernovae über die gesamte 13 Milliarden Jahre

lange Geschichte unserer Galaxie das häufigste Szenario waren. »Wir können noch nicht festlegen, welches der vielen möglichen Sub-Chandrasekhar-Szenarien das realistischste ist«, sagt Bergemann. »Aber wir sind sicher, dass sie weit häufiger sind als Supernova-Explosionen an der Chandrasekhar-Masse.«

Dem stimmt auch Wolfgang Hillebrandt vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching zu, der nicht an der Arbeit beteiligt war. Die Untersuchung bringe das Gebiet um einen wesentlichen Schritt voran, denn bislang hätten viele Experten noch an der Existenz von Sub-Chandra-Explosionen gezweifelt. Ihm zufolge könnte deren Anteil sogar eher bei 90 als bei 75 Prozent liegen.

Das Ergebnis könnte dabei helfen, frühere Unstimmigkeiten bei der Auswertung von Supernova-Daten zu erklären: Einer Forschergruppe um Mark Sullivan von der University of Oxford war im Jahr 2010 aufgefallen, dass Typ-Ia-Supernovae in Galaxien mit besonders alten Sternen systematisch etwas heller ausfallen als solche in sehr jungen Galaxien.

Ein kleiner Teil der beobachteten Abschwächung der Leuchtkraft hat also in manchen Fällen nichts mit ihrer Entfernung zu uns zu tun. Kosmologen tragen dem in ihren Analysen seit Jahren Rechnung. Wie groß diese Korrektur jeweils sein sollte, ist jedoch umstritten – auch da man die genauen physikalischen Hintergründe des Effekts nicht kennt.

Allerdings ist es für Wissenschaftler, die Supernovae zur Kartierung des Kosmos benutzen, ziemlich egal, was genau sich hinter Typ-Ia-Explosionen verbirgt. Sie wissen schon länger, dass es sich bei den Ereignissen nicht um stets identische »Standardkerzen« handelt. Sondern eher um eine Bandbreite unterschiedlich heller Strahlungsquellen, die man mit einem komplizierten Verfahren vergleichbar machen kann.

Wie viel Strahlung solche standardisierten Kerzen dann aussenden, wird in Galaxien in unserer Nachbarschaft über den Vergleich mit Cepheiden-Sternen ermittelt, deren Leuchtkraft besser bekannt ist. Und dieser Wert bildet dann

die Basis dafür, die Entfernung zu noch weiter entfernten Supernovae vom Typ Ia abzuschätzen.

Frühere kosmologische Studien wären also nur dann fehlerhaft, wenn Weiße Zwerge in der grauen Vorzeit des Alls im großen Stil anders explodiert wären als in der jüngeren Vergangenheit beziehungsweise wenn früher mehrheitlich ein abweichender Ablauf in den Sterntod führte. Ob das der Fall ist, erscheint fraglich – die aktuelle Studie erlaubt jedenfalls keine Aussage dazu.

Jan Hattenbach ist Physiker und arbeitet als Wissenschaftsjournalist auf La Palma.

QUELLEN

Eitner, P. et al.: Observational constraints on the origin of the elements. III. Evidence for the dominant role of sub-Chandrasekhar SN Ia in the chemical evolution of Mn and Fe in the Galaxy. *Astronomy & Astrophysics* 635, 2020

Sullivan, M. et al.: The dependence of type Ia supernovae luminosities on their host galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 406, 2010

INFORMATIK KI LERNT DIE SPRACHE DER MATHEMATIK

Bisher konnten neuronale Netze bloß einfache Ausdrücke addieren und multiplizieren. Nun haben Informatiker einen selbstlernenden Algorithmus vorgestellt, der Differenzialgleichungen löst und Stammfunktionen berechnet – und dabei alle bisherigen Methoden übertrifft.

▶ In einigen Fachgebieten begegnet man komplizierten mathematischen Ausdrücken: sei es eine Differenzialgleichung in der Biologie, die die Ausbreitung einer Viruserkrankung modelliert, oder ein Integral in der Physik, das die Länge einer bestimmten Kurve berechnet. Um solche Aufgaben zu meistern, muss man häufig tief in die Trickkiste greifen, indem man zum Beispiel einige Terme mühsam umformuliert oder eine Gleichung partiell integriert. Oft kommt man allerdings nicht darum herum, in Formelsammlungen nachzu-

schlagen. Im Alltag greifen Forscher meist auf algebraische Computerprogramme wie Mathematica, Maple oder Matlab zurück, die mit mathematischen Ausdrücken umgehen können.

Deren Algorithmen sind allerdings nicht perfekt. Nicht immer finden sie das korrekte Ergebnis, zudem brauchen sie für einige Probleme extrem lange. Die französischen Informatiker Guillaume Lample und Francois Charton, beide bei Facebook AI Research in Paris, haben nun einen Algorithmus entwickelt, der diese Aufgabe besser und schneller meistert als bisherige

Spektrum PLUS⁺

Ihre Vorteile als Abonnent

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

- ▶ Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**
- ▶ Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von Partnern zum Vorteilspreis
- ▶ **Digitales Produkt** zum kostenlosen Download und weitere Vorteile:

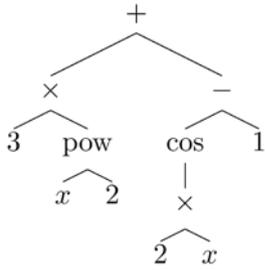
Download des Monats im Juli: Spektrum Kompakt »Der Traum vom Fliegen«

Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Reduzierte Digitalpakete »Wasser«, »Intelligenz« sowie »Energie«

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus



Mathematische Ausdrücke lassen sich durch Baumdiagramme darstellen, wie die Formel $3x^2 + \cos(2x) - 1$.

Software. Damit gelang es den Forschern erstmals, einer KI die symbolische Sprache der Mathematik beizubringen.

Denn genau darin liegt die Schwierigkeit: Eine komplizierte Formel ist nichts anderes als eine Kurzschreibweise für aneinandergereihte Operationen. Zum Beispiel steht x^3 für $x \cdot x \cdot x$, und das Malzeichen entspricht einer wiederholten Addition. Ebenso repräsentieren Symbole wie Integralzeichen, Ableitungen oder Funktionen unzählige nacheinander ausgeführte Berechnungen. Diese Abstraktion, die vielen Menschen bereits in der Schule umstände bereitet, sorgt auch bei Computerprogrammen für Probleme.

Damit eine KI lernt, Gleichungen zu lösen, haben Lample und Charton die komplizierten Formeln in Baumdiagramme umgeschrieben (siehe oben).

Die Blätter entsprechen dabei Zahlen, Konstanten oder Variablen wie x , während die inneren Knoten eine Operation darstellen, etwa eine Addition oder ein Integral. Zwei Baumdiagramme gelten als gleich, wenn sie mathematisch übereinstimmen. Etwa ist $3x + 15 = 9$ dasselbe wie $x + 5 = 3$ und $x = -2$, wodurch ihre dazugehörigen Diagramme äquivalent sind. Die französischen Forscher wollten ihrer KI daher beibringen, einem vorgegebenen Baumdiagramm ein anderes zuzuordnen, dessen algebraische Form der Lösung entspricht.

Diese Art von Problem ist in der Informatik nicht neu. Maschinelle Übersetzungsprogramme müssen einer längeren Eingabe von Wörtern oder Sätzen eine dazugehörige Buchstaben-

folge in einer anderen Sprache zuweisen. Google veröffentlichte bereits 2018 eine Familie von Algorithmen namens Seq2Seq, die solche Übersetzungen beherrschen. Lample und Charton griffen darauf zurück, um ihre KI zu trainieren.

Das Gehirn als Vorbild

Seq2Seq-Algorithmen sind rekurrente neuronale Netze. Sie bestehen aus künstlichen, in Schichten angeordneten Neuronen, die – anders als in gewöhnlichen neuronalen Netzen – nicht bloß Informationen in eine Richtung transportieren, sondern auch rückwärts. Die künstlichen Neurone feuern ihre Signale also wie im Gehirn entweder in die nachfolgende, in die gleiche oder in die vorangegangene Schicht. Damit erhält das Netzwerk eine Art Gedächtnis; es kann Informationen speichern. Diese Eigenschaft ist bei Übersetzungen entscheidend. Denn man überführt nicht jedes Wort einzeln in eine andere Sprache, sondern schafft einen Bezug zu einem ganzen Satz oder gar Textabschnitt. Gleiches trifft auf Gleichungen zu: Das Programm muss eine Verkettung von Symbolen als Einheit auffassen und nicht bloß einzelne Bestandteile daraus separat bearbeiten.

Nun brauchten Lample und Charton noch Daten, um das Seq2Seq-Netzwerk zu trainieren. Dazu nutzten sie einen weiteren Algorithmus, der zufällige algebraische Ausdrücke erzeugt. Diese enthielten Multiplikationen und Additionen von Variablen, Konstanten und Zahlen sowie einfacher Funktionen wie Sinus oder der Exponentialfunktion. Anschließend integrierten und differenzierten sie die Ausdrücke mit Hilfe bestehender Computerprogramme. Das lieferte ihnen einen riesigen Datensatz mit je 40 Millionen gewöhnlichen Differentialgleichungen erster und zweiter Ordnung sowie 20 Millionen Integralen, mit denen sie ihr rekurrentes neuronales Netz fütterten.

Um die erlernten Fähigkeiten ihres Programms zu untersuchen, setzten sie ihm 5000 weitere mathematische Ausdrücke vor, die es nie zuvor gesehen hatte. Der Algorithmus sollte zu

einer vorgegebenen Funktion entweder die dazugehörige Stammfunktion finden oder eine Differentialgleichung lösen. Lample und Charton wollten ihre Ergebnisse mit denen herkömmlicher Programme wie Mathematica, Matlab oder Maple vergleichen. Weil diese allerdings deutlich langsamer sind, führten sie den Test mit lediglich 500 zufällig ausgewählten Resultaten durch.

Wie sich herausstellte, übertraf das neuronale Netz die bewährten Algorithmen in allen Aufgaben. Es war dabei nicht nur wesentlich schneller – statt etwa einer halben Minute bei komplexen Ausdrücken brauchte es weniger als eine Sekunde –, sondern auch akkurater. Während Mathematica, das unter den gewöhnlichen Programmen am besten abschnitt, bei der Integration eine Genauigkeit von gerade einmal 85 Prozent erreichte, schaffte die KI für die gleiche Aufgabe beeindruckende 99,7 Prozent. Für gewöhnliche Differentialgleichungen lieferte das neuronale Netz ebenfalls bessere Resultate.

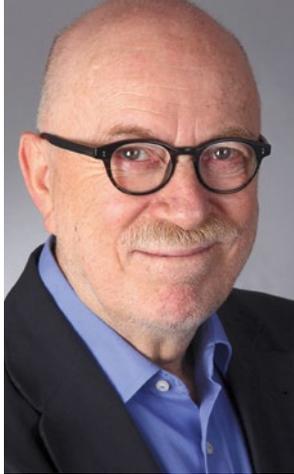
Interessanterweise fand die KI häufig mehrere Lösungen zu einem Problem. Für jede Aufgabe liefern neuronale Netze nämlich zahlreiche mögliche Ergebnisse, die es nach der Wahrscheinlichkeit sortiert, dass es richtig ist. Als Lample und Charton die verschiedenen Möglichkeiten durchsahen, fiel ihnen auf, dass fast alle der gleichen korrekten Lösung entsprachen – nur anders formuliert. »Es ist faszinierend, dass unser Modell äquivalente Ausdrücke erkennt, ohne dass wir es darauf trainiert haben«, kommentieren die beiden Forscher diesen Aspekt ihrer Arbeit.

Damit haben sie gezeigt, dass sich neuronale Netze dazu eignen, komplizierte mathematische Berechnungen durchzuführen. In Zukunft ließen sich dadurch wesentlich effizientere Computerprogramme entwickeln, welche die Arbeit etlicher Naturwissenschaftler erleichtern könnten.

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

QUELLE

Lample, G., Charton, F.: Deep learning for symbolic mathematics. ArXiv: 1912.01412, 2019



SPRINGERS EINWÜRFE SCHWARZER SCHWAN IM INTERNET

Die Pandemie stellt Computeralgorithmen vor ungeahnte Probleme: Plötzlich verhalten sich die Menschen völlig anders, als die Programme gelernt haben.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

» spektrum.de/artikel/1736682

Den ersten internationalen Warnhinweis auf das neue Coronavirus lieferte ein Computer. Am 30. Dezember 2019 meldete HealthMap – eine US-Website des Boston Children’s Hospital, die mittels künstlicher Intelligenz (KI) soziale Medien automatisch nach Krankheitsausbrüchen durchforstet –, es gebe Berichte über ein neuartiges Lungenleiden in Wuhan. Nach kaum einer Stunde erreichte die Meldung ProMED, eine Seuchen-Website mit knapp 85000 Abonnenten (*Science* 368, S. 810–811, 2020).

Soll man also künftig die Suche nach neuen Infektionen vertrauensvoll in die Hände von Algorithmen legen, die Alarm schlagen, sobald sie aus den digitalen Sozialkontakten drohende Epidemien herauslesen? Lieber nicht. Ein abschreckendes Beispiel lieferte die US-Firma Google mit ihrem 2008 gestarteten Netzdienst Google Flu Trends, der aus den Suchanfragen auf der eigenen Plattform Grippeepidemien vorhersagen wollte, jedoch zwischen 2011 und 2013 unentwegt falschen Alarm gab (siehe meinen Einwurf vom Mai 2014).

Der Grund: Menschen ändern manchmal ihr Verhalten in unvorhersehbarer Weise; sie suchen zum Beispiel immer öfter nach Grippemeldungen, ohne sich selbst krank zu fühlen. Auf die neue Besorgnis muss das KI-System dann erst eigens trainiert werden.

Noch viel krasser ändert sich das Verhalten beim Ausbruch einer Pandemie. Ende Februar dauerte es kaum eine Woche, bis unter den bei Amazon besonders gefragten Artikeln Toilettenpapier, Gesichtsmasken und Desinfektionsmittel die Spitzenplätze eroberten; vordem waren es Smartphone-Hüllen, Elektronikteile und Legobaukästen gewesen. Die plötzlich ansteigende Nachfrage nach coronahalber begehrten Waren spiegelte getreu den Zeitverlauf der ersten Ansteckungen wider: Zuerst schnellten sie früh in Italien hoch, dann hintereinander in Spanien, Frankreich, Deutschland, Großbritannien und schließlich in den USA (*MIT Technology Review*, 11. Mai 2020).

Wenn in der Pandemie die Normalität zusammenbricht, kommt die künstliche Intelligenz gehörig durcheinander. Sie ist auf das Auftreten eines »Schwarzen Schwans« nicht gefasst. So nennt man – seit dem gleichnamigen Bestseller von Nassim Nicholas Taleb – ein höchst unwahrscheinliches, kaum vorhersehbares Ereignis. Der Name erinnert an den berühmten Beispielsatz des Philosophen Karl Popper »Alle Schwäne sind weiß«, der so lange gilt, bis ihn eine einzige Ausnahme falsifiziert.

Der Schwarze Schwan der Pandemie führt vor, wie stark Algorithmen bereits unser Leben prägen – und wie dringend man sie modifizieren muss, sobald sich unser Verhalten auf einmal radikal wandelt. Zum Beispiel beginnen viele Menschen in ihrer sozialen Isolation die Heimarbeit zu entdecken und bestellen ungewöhnlich oft schweres Werkzeug und Gartengeräte. Das ruft unter Umständen KI-Programme auf den Plan, die gelernt haben, dahinter Kreditkartenbetrug oder Einbruchsvorbereitungen zu wittern. Also müssen menschliche Programmierer die neue Normalität in Algorithmen übersetzen.

Insgesamt hat sich das Internet ziemlich reibungslos auf die veränderte Nutzung eingestellt. Sie nahm in der ersten Jahreshälfte um geschätzte 40 Prozent zu, und ihr Maximum verlagerte sich vom Feierabend auf den späten Vormittag, an dem sich jetzt offenbar virtuelle Meetings und Heimunterricht häufen. Zudem scheinen mit dem Homeoffice die lokalen Spitzen der Netzaktivität aus den Stadtzentren an deren Ränder zu wandern (*MIT Technology Review*, 7. April 2020).

Eigentlich erstaunlich, wie gut das weltweite Netz die enorm gestiegene Belastung ausgehalten hat. Das gelang nur, weil heimlich, still und leise in Windeseile hunderte zusätzliche Server entstanden – und weil die Lieferkette für Halbleiter und Glasfasern aus China nie unterbrochen wurde.

HIRNFORSCHUNG DER GESICHTSCODE

Wie das Gehirn menschliche Antlitze identifiziert, blieb lange rätselhaft. Inzwischen kennen Forscher auf Gesichter spezialisierte Hirnzellen, deren Reaktionen sich mathematisch beschreiben lassen. Auf der gleichen Grundlage könnte generell die visuelle Wahrnehmung beruhen.



Doris Y. Tsao ist Biologin und Mathematikerin, Professorin am California Institute of Technology in Pasadena (USA) und Direktorin des zugehörigen Tianqiao and Chrissy Chen Center for Systems Neuroscience.

► [spektrum.de/artikel/1736684](https://www.spektrum.de/artikel/1736684)

► Als Studentin am California Institute of Technology hörte ich von den bahnbrechenden Experimenten von David Hubel und Torsten Wiesel. Die beiden hierfür mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Neurophysiologen hatten entdeckt, wie der primäre visuelle Kortex des Gehirns Kanten aus den von den Augen gelieferten Bildern extrahiert.

Demnach lässt sich mit Neurowissenschaft verstehen, wie neuronale Aktivitäten eine bewusste Wahrnehmung erzeugen. Ich kann kaum die Aufregung beschreiben, in die mich diese Erkenntnis versetzte. Ich hatte meinen Lebensraum gefunden: zu untersuchen, wie die visuelle Wahrnehmung funktioniert und wie das Gehirn aus elektrischer Aktivität wahrgenommene Gegenstände codiert - und zwar nicht nur simple Linien, sondern auch schwer definierbare Objekte wie Gesichter. Die Frage lautete also: Welche Hirnregionen sind damit befasst und welche Muster neuronaler Impulse versetzen uns in die Lage, unsere Mitmenschen zu identifizieren?

Meine Entdeckungsreise begann im Aufbaustudium an der Harvard University, wo ich das stereoskopische Sehen erforschte: jenen Mechanismus, der aus den Unterschieden

Wie erkennen wir das Gesicht eines anderen Menschen? Offensichtlich wertet das Gehirn charakteristische Merkmale der Physiognomie mathematisch aus.



AUF EINEN BLICK VON ANGESICHT ZU ANGESICHT

- 1** Wie das Gehirn visuelle Objekte wahrnimmt, ist noch weitgehend unverstanden. Zu den großen Fragen zählt vor allem das Rätsel der Gesichtserkennung.
- 2** In bestimmten Bereichen der Großhirnrinde, den so genannten Face-Patches, sprechen Neurone auf Gesichter an. Die Zellen reagieren dabei auf Merkmale, die sich über Form und Erscheinungsbild eines Gesichts mathematisch definieren lassen.
- 3** Dieser Gesichtscodex könnte den Schlüssel für die Wahrnehmung anderer Objekte liefern.

zwischen den Bildern der beiden Augen den Eindruck von Raumtiefe erzeugt. Dabei stieß ich auf eine Veröffentlichung der Neurowissenschaftlerin Nancy Kanwisher, damals am Massachusetts Institute of Technology, und ihrer Kollegen über bildgebende Untersuchungen von Gehirnen menschlicher Probanden. Mit Hilfe der funktionalen Magnetresonanztomografie (fMRT) hatte die Arbeitsgruppe eine Hirnregion aufgespürt, die auf Bilder von Gesichtern viel stärker reagierte als auf Darstellungen anderer Objekte. Das klang für mich geradezu absurd, hatte ich doch gelernt, dass wir die Funktionen der verschiedenen Hirnteile, mögen sie Basalganglien oder orbitofrontaler Kortex heißen, erst ansatzweise erraten. Die Vorstellung, es gäbe ein Areal, das ganz speziell dem Erkennen von Gesichtern dient, erschien mir vollkommen abwegig.

Als Doktorandin hatte ich per fMRT bei Affen Hirnareale identifiziert, die sich während der Wahrnehmung von dreidimensionalen Bildern regen. Nun zeigte ich einem Affen Gesichter und andere Objekte. Tatsächlich fand ich im Schläfenlappen der Hirnrinde – genauer im inferioren temporalen (IT) Kortex – mehrere Bereiche, die selektiv auf Gesichter ansprachen. Charles Gross, ein Pionier auf dem Gebiet der visuellen Objektwahrnehmung, hatte bereits Anfang der 1970er Jahre im IT-Kortex von Makaken gesichtsspezifische Neurone entdeckt. Doch seiner Beschreibung nach verteilten sich diese Zellen ohne erkennbare Ordnung im gesamten IT-Kortex. Unsere Ergebnisse aus den fMRT-Untersuchungen wiesen dagegen zum ersten Mal darauf hin, dass solche Gesichtsneurone in bestimmten Regionen konzentriert sein könnten.

Das goldene Ei

Nachdem ich meine fMRT-Studie publiziert hatte, bewarb ich mich beim California Institute of Technology in Pasadena und präsentierte hierfür meine Ergebnisse in einem Vortrag. Die Stelle bekam ich allerdings nicht. Etliche Forscher bezweifelten die Aussagekraft der fMRT, die ja lediglich den lokalen Blutfluss misst. Eine örtlich erhöhte Durchblutung beim Betrachten von Gesichtern erlaube keine Rückschlüsse darauf, welche Hirnzellen sich dabei tatsächlich regen. Möglicherweise enthielten diese Regionen nur zufällig etwas mehr Neurone, die auf Personen ansprechen – ähnlich einer zufällig auftretenden Gruppe von Eisbergen im Meer.

Da ich meine bildgebenden Untersuchungen bei Affen durchgeführt hatte, konnte ich diesen Einwand direkt überprüfen. Zusammen mit Winrich Freiwald, damals Postdoc in Margaret Livingstones Labor an der Harvard University, schob ich eine dünne Elektrode in eine Hirnregion vor, die wir im fMRT als Kandidat für Gesichtswahrnehmung identifiziert hatten. Damit konnten wir der Frage nachgehen: Was stimuliert einzelne Neurone in dieser Region am stärksten? Wir zeigten dem Affen Bilder von Gesichtern oder anderen Objekten und wandelten die dabei von der Elektrode aufgezeichneten elektrischen Impulse einzelner Neurone in akustische Signale um, die wir über einen Lautsprecher im Labor hören konnten.

Das Ergebnis war erstaunlich: Praktisch jede einzelne Zelle des Gebiets, das ich im fMRT identifiziert hatte, verar-

beitete Informationen über Gesichter. Ich kann mich noch gut an unsere Aufregung erinnern, als wir zum ersten Mal das Knacken einer Zelle hörten, die lebhaft auf Gesichter reagierte, bei anderen Objekten jedoch schwieg. Sofort hatten wir das Gefühl, etwas Bedeutsames auf der Spur zu sein: einem Bereich der Hirnrinde, der uns die Mechanismen der Repräsentation visueller Objekte offenbaren könnte. Livingstone bemerkte: »Da hast du wohl ein goldenes Ei gefunden.«

An eine weitere Überraschung während dieses Experiments kann ich mich ebenfalls entsinnen: Ich hatte erwartet, dass der Gesichtsbereich Neurone enthalte, die selektiv auf einzelne Individuen ansprechen – analog den orientierungsempfindlichen Hirnzellen des primären visuellen Kortex, die jeweils auf eine bestimmte Anordnung von Kanten reagieren. Tatsächlich hatte eine Reihe von viel diskutierten Studien nahegelegt, dass einzelne Neurone bemerkenswert selektiv auf Gesichter uns bekannter Personen antworten, also zum Beispiel exklusiv auf Bilder der Schauspielerin Jennifer Aniston. Doch entgegen meiner Erwartung feuerten alle sondierten Zellen bei fast jedem Gesicht.

Wie besessen manipulierte ich nun mit Photoshop alle möglichen Porträts. Damit fand ich heraus: Die Neurone reagierten nicht nur auf realistische Konterfeis von Menschen und Affen, sondern auch auf stark vereinfachte Comiczeichnungen.

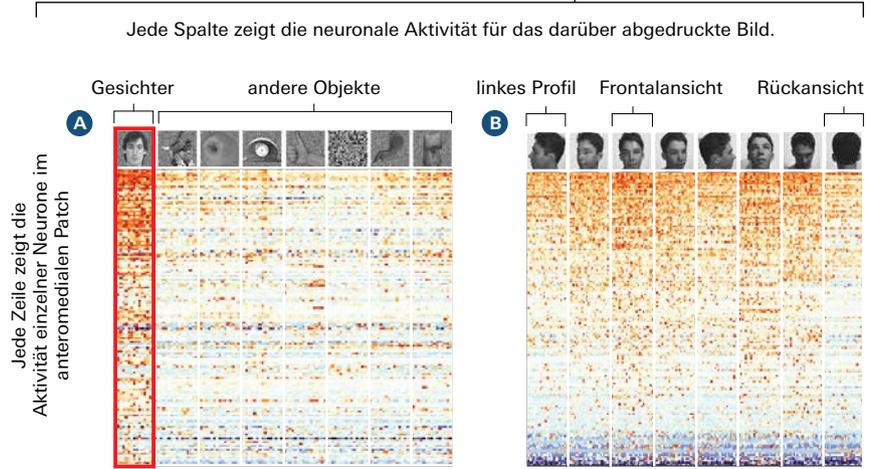
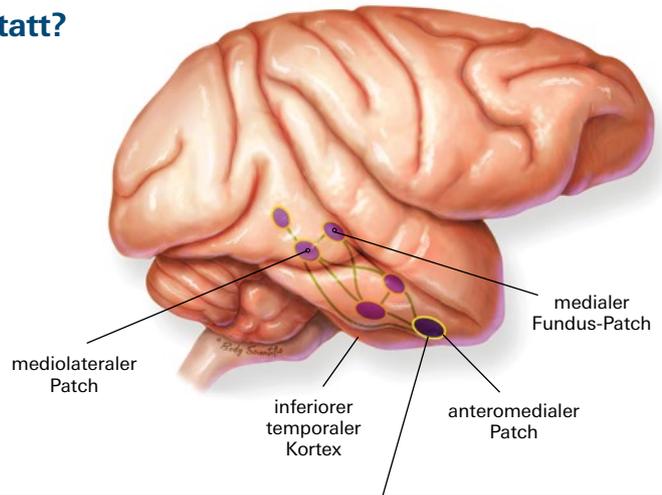
Daraufhin kreierte ich Cartoongesichter mit 19 verschiedenen Merkmalen, an denen wir vermutlich Individuen erkennen, etwa Augenabstand, Verhältnis von Kopflänge zu Breite oder Position des Mundes. Dann veränderten wir diese Charakteristika, zum Beispiel indem wir den Augenabstand auf fast zyklische Enge stauchten oder bis zum Rand des Gesichtsfelds dehnten. Die einzelnen Neurone reagierten auf die meisten der manipulierten Porträts, doch interessanterweise nicht immer gleich. Vielmehr variierten ihre Antworten systematisch: Trugen wir die Impulsraten in Abhängigkeit von den Merkmalsausprägungen auf, ergab sich eine minimale Reaktion auf das eine Extrem (etwa ein sehr enger Augenabstand), eine maximale auf das Gegenteil (weiter Augenabstand), und bei moderateren Ausprägungen lag die Antwort in der Mitte. Die zugehörigen Kurven ähnelten ansteigenden oder abfallenden Rampen.

Bei meinem nächsten Bewerbungsvortrag am California Institute of Technology hatte ich mehr zu bieten als nur fMRT-Bilder. Angesichts der neuen Daten zur Aktivität von Einzelzellen leuchtete nun allen Zuhörern ein, dass im Gehirn tatsächlich »Face-Patches« existieren, die höchstwahrscheinlich eine wichtige Rolle beim Erkennen von Gesichtern spielen. Die zu Grunde liegenden neuronalen Prozesse zu untersuchen, erschien somit als aussichtsreicher Schritt, um die allgemeinere Frage zu klären, wie das Gehirn visuell wahrgenommene Objekte repräsentiert. Dieses Mal bekam ich die Stelle.

Am California Institute of Technology beschäftigte sich meine Arbeitsgruppe dann näher mit dem Problem, wie diese Neurone Gesichter erkennen. Dabei ließen wir uns von Pawan Sinha inspirieren, der am Massachusetts Institute of Technology auf dem Gebiet der visuellen Informatik forscht. Wie er vermutete, ließen sich Gesichter anhand von

Wo findet die Gesichtserkennung statt?

Eine Gruppe von sechs Hirnarealen im inferioren temporalen (IT) Kortex beider Hemisphären ist darauf spezialisiert, Gesichter zu identifizieren. Diese »Face-Patches« arbeiten in einer Prozesskette: Im mediolateralen und medialen Fundus-Patch regt sich ein bestimmtes Neuron, sobald das betrachtete Gesicht direkt nach vorne schaut, während sich ein anderes beim Blick nach rechts einschaltet. Am Ende der Prozesskette, im anteromedialen Patch, vereinigen sich die verschiedenen Perspektiven zu einem gemeinsamen Datensatz. Hier reagieren Neurone auf die individuelle Person unabhängig von deren Blickrichtung. Hirnzellen in einem Face-Patch eines Affen reagieren auf Gesichter (rote Bereiche in **A**), nicht jedoch auf andere Objekte. Und sie antworten auf das aus unterschiedlichen Winkeln getroffene Gesicht desselben dunkelhaarigen Mannes (rote Bereiche in **B**).



Kontrastverhältnissen identifizieren, also etwa dem Helligkeitsunterschied zwischen Stirn und Mundregion. Sinha schlug zudem eine raffinierte Methode vor, um die wirklich relevanten Kontrastverhältnisse zu ermitteln: Diese müssten nämlich unabhängig von der Beleuchtung als Kriterium der Gesichtserkennung funktionieren. Zum Beispiel erscheint ein Auge stets dunkler als die Nase, da es keine Rolle spielt, aus welcher Richtung ein Gesicht fotografiert wird – probieren Sie es aus!

Hintereinandergeschaltete Gesichtsbereiche

Theoretisch legt das einen eleganten Mechanismus der Gesichtserkennung nahe, und wir fragten uns natürlich, ob die Gesichtszellen ihn tatsächlich nutzen. Als wir nun die neuronalen Reaktionen auf verschiedene Konterfeis untersuchten, beobachteten wir, dass einzelne Zellen oft eine klare Vorliebe für ein bestimmtes Kontrastmerkmal besaßen. Erstaunlicherweise zeigten dabei alle Zellen bis auf eine einzige Ausnahme die gleiche Kontrastpräferenz. Und die präferierten Merkmale waren genau diejenigen, welche Sinha als stabil gegenüber Veränderungen der Beleuchtung ausgemacht hatte. Unser Experiment bestätigte damit, dass Gesichtsbereiche Kontrastverhältnisse nutzen.

In unseren fMRT-Experimenten hatten wir zunächst nur zwei Zonen der Hirnrinde aufgespürt, die auf Gesichter ansprechen. Doch wie weitere fMRT-Bilder offenbarten, bei denen wir das Signal durch ein Kontrastmittel mehrfach verstärkten, existieren in beiden Hirnhälften jeweils sechs Face-Patches – damit haben wir quasi zwölf goldene Eier. Diese Areale sind über die gesamte Länge des IT-Kortex im Schläfenlappen verteilt, allerdings nicht zufällig. Vielmehr liegen die sechs Bereiche bei allen Individuen in vergleichbaren Regionen. Arbeiten unserer und weiteren Gruppen ergaben zudem ähnliche Face-Patches-Muster beim Menschen und bei anderen Primaten wie etwa Krallenaffen.

Das einheitliche Verteilungsmuster könnte bedeuten, dass es sich um eine kettenförmige Anordnung von neuronalen Modulen handelt, die Daten zur Gesichtserkennung sequenziell verarbeiten. Falls dies zuträfe, sollten die sechs Areale miteinander verbunden sein, wobei jedes eine bestimmte Funktion erfüllt.

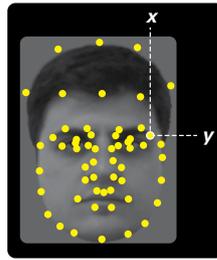
Um solche neuronalen Verbindungen zwischen den Face-Patches nachzuweisen, stimulierten wir verschiedene Areale mit schwachen elektrischen Strömen, während der Affe in der fMRT-Röhre lag. Dadurch wollten wir herausfinden, welche anderen Hirnregionen aktiv werden, sobald wir

GEBIHN: BODY SCIENTIFIC / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2019; UNTER: FREIWALD, W.A., TSAO, D.Y.: FUNCTIONAL COMPARTMENTALIZATION AND VIEWPOINT GENERALIZATION WITHIN THE MACAQUE FACE-PROCESSING SYSTEM. SCIENCE 330, 2010, FIG. 2. MODIFIZIERT VON SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Form + Erscheinung = Gesicht

Nach der Entdeckung der Face-Patches galt es zu erforschen, was in den hier liegenden Neuronen geschieht, um so das Codierungsschema des Gehirns für Gesichter zu entschlüsseln. Als quantitative Messgrößen für Gesichter entwickelte das Team von Doris Tsao 25 Parameter für die Form sowie 25 für das Erscheinungsbild, die jedes Neuron in einem Face-Patch verwenden könnte. Somit entstand ein 50-dimensionaler Gesichtsraum. Die Formmerkmale wie Kopfbreite oder Augenabstand sind anatomisch definiert; Erscheinungsmerkmale charakterisieren hingegen die Oberflächenbeschaffenheit (Teint, Augen- oder Haarfarbe).

Form: definiert durch die Position (x-/y-Koordinaten) charakteristischer Orientierungspunkte (gelb)



Beispiele für Variabilität

Durchschnittsform

Erscheinung: Helligkeitsvariationen nach Anpassung der Form an ein Durchschnittsgesicht



Beispiele für Variabilität

CHANG, L., TSAO, D.Y.: THE CODE FOR FACIAL IDENTITY IN THE PRIMATE BRAIN. CELL 168, 2017. FIG. 1. MODIFIZIERT VON JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

einen Face-Patch stimulieren. Tatsächlich regten sich jeweils alle anderen Face-Patches, nicht aber die umgebende Hirnrinde – die Gesichtsareale sind also gezielt miteinander vernetzt.

Zudem stellte sich heraus, dass jeder Bereich unterschiedliche Funktion erfüllt. Als wir den Tieren 25 menschliche Porträts in jeweils acht verschiedenen Perspektiven präsentierten, reagierten Hirnzellen in drei Gebieten: im mediolateralen und medialen Fundus-Patch (ML/MF), im anterolateralen (AL) sowie im anteromedialen (AM) Patch. Dabei zeigten sich auffallende Unterschiede der drei Bereiche: Die Zellen im ML/MF-Patch sprachen selektiv auf bestimmte Perspektiven an. So reagierte ein Neuron bevorzugt auf Antlitze, die exakt geradeaus schauten, während andere nach links blickende Gesichter präferierten. Neurone des AL-Patches erwiesen sich als weniger wählerisch. Eine Klasse von Zellen antwortete auf Gesichter, die nach oben, nach unten oder geradeaus blickten. Eine andere registrierte nur solche, die nach rechts oder links ausgerichtet waren. Im AM-Patch wiederum reagierten die Zellen auf bestimmte Individuen, gleichgültig ob das jeweilige Konterfei frontal oder im Profil getroffen war. Am Ende der Prozesskette, im AM-Patch, waren also die perspektivabhängigen Repräsentationen eines individuellen Gesichts bereits zu einem orientierungsunabhängigen Datensatz verarbeitet (siehe »Wo findet die Gesichtserkennung statt?«, S. 33).

Offenbar kooperieren die Gesichtsareale erfolgreich bei der Bewältigung eines der größten Probleme der visuellen Wahrnehmung: Wie erkennen wir Gegenstände wieder, obwohl sich ihr Erscheinungsbild ständig wandelt? Wir identifizieren ein Objekt als Auto – unabhängig von Marke

oder Farbe, vom Blickwinkel oder von der Entfernung, ja sogar dann, wenn es teilweise von davor stehenden Bäumen oder anderen Fahrzeugen verdeckt wird. Die Herausforderung, Objekte trotz aller Erscheinungsformen wiederzuerkennen, wird als Invarianzproblem bezeichnet. Offensichtlich liegt eine Hauptfunktion des Netzwerks der Face-Patches genau darin, dieses Problem zu lösen.

Verzerrte Wahrnehmung

Da die Neurone der Face-Patches auf Veränderungen der Identität von Gesichtern höchst empfindlich reagieren, sollte man erwarten, dass umgekehrt eine Manipulation der Aktivität dieser Zellen zu einer veränderten Identitätswahrnehmung führt. Das Team um den Neurowissenschaftler Josef Parvizi von der Stanford University hatte ein Face-Patch menschlicher Patienten mit Elektroden stimuliert, die ihnen implantiert worden waren, um die Quelle ihrer epileptischen Anfälle zu lokalisieren. Tatsächlich ließ sich damit die Wahrnehmung von Gesichtern verzerren.

Wir fragten uns, ob es bei unseren Affen wohl vergleichbare Effekte gäbe. Und würden dann ausschließlich Gesichter anders wahrgenommen oder auch andere Objekte? Schließlich verläuft die Wahrnehmungsgrenze zwischen einem Gesicht und etwas anderem fließend: Selbst in einer Wolke oder einer Steckdose erkennen wir oft menschliche Antlitze. Mittels Mikrostimulation versuchten wir daher genau abzugrenzen, was ein Face-Patch noch als Gesicht registriert. Unsere Affen trainierten wir nun darauf, zu entscheiden, ob zwei nacheinander gezeigte Porträts identisch oder verschieden sind. Wie bei menschlichen Probanden verzerrte die Mikrostimulation von Face-Patches die Wahr-

nehmung derart, dass das Tier zwei eigentlich identische Gesichter stets als verschieden interpretierte.

Interessanterweise wirkte sich die Mikrostimulation nicht auf das Wahrnehmen ganz anderer Objekte aus, beeinflusste aber die Reaktionen auf Gegenstände, deren Umrisse denen eines Gesichts ähnelten wie zum Beispiel Äpfel. Warum ist das so?

Eine Möglichkeit wäre, dass Face-Patches nicht nur dazu dienen, Gesichter zu repräsentieren, sondern auch andere rundliche Objekte. Einer weiteren Hypothese zufolge reagieren diese Areale normalerweise nicht auf solche Gegenstände, sondern erst die Mikrostimulation bewirkt, dass ein Apfel als Gesicht erscheint. Es bleibt also unklar, ob Face-Patches auch zum Erkennen von Objekten dienen, die keine Gesichter sind.

Dass es uns gelungen war, die Organisation der Face-Patches und die Reaktionsweise ihrer Zellen aufzuklären, war ein großer Erfolg. Doch ich wollte ja ursprünglich mehr erreichen: den neuronalen Code für Gesichter knacken. Damit sollte sich vorhersagen lassen, wie eine einzelne Zelle auf ein bestimmtes Gesicht reagiert, und umgekehrt sollte das Muster neuronaler Aktivität die Identifikation eines beliebigen Gesichts ermöglichen.

Die Herausforderung bestand nun darin, Gesichter quantitativ mit hoher Präzision zu beschreiben. Mein damaliger Postdoc Le Chang hatte den brillanten Einfall, eine Technik aus der Bildverarbeitung zu übernehmen, die als Active Appearance Model bezeichnet wird. Dabei werden einem Gesicht zwei Sätze so genannter Deskriptoren zuge-

ordnet: für die Form sowie für das Erscheinungsbild. Anatomische Messgrößen wie Kopfbreite oder Augenabstand legen die Form fest, während sich die Erscheinung über Oberflächeneigenschaften wie Teint, Augen- oder Haarfarbe definiert.

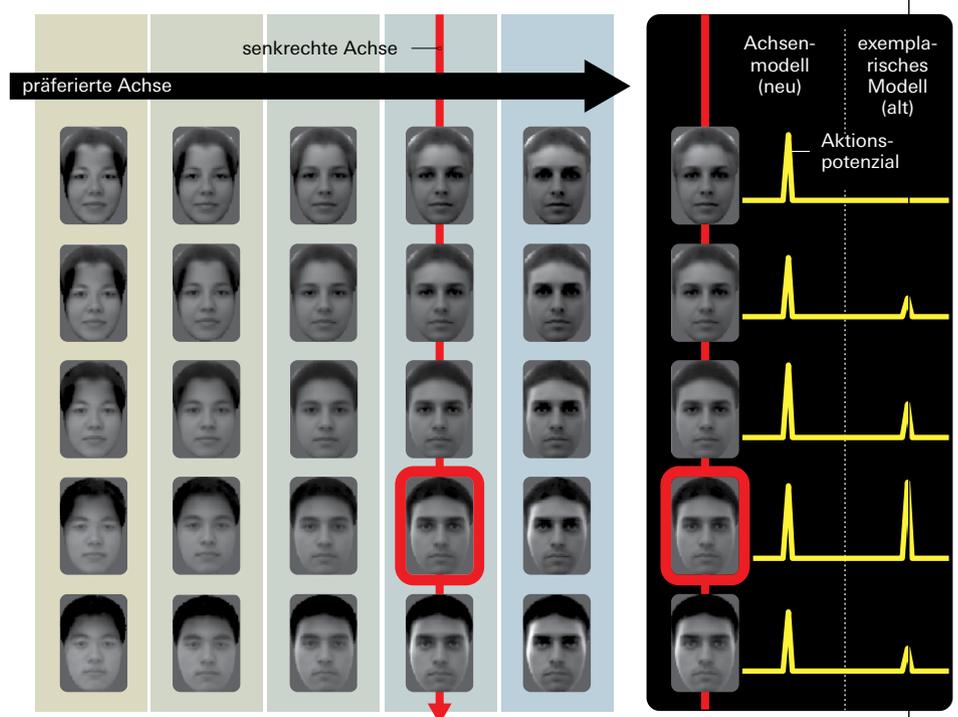
Diese Deskriptoren erzeugten wir aus einer umfangreichen Datenbank menschlicher Porträts, in denen wir charakteristische Stellen markierten. Die räumliche Lage der Markierungen beschreibt die Form des jeweiligen Gesichts. Aus zahlreichen solcher Formbeschreibungen errechneten wir dann ein Durchschnittsgesicht. Im nächsten Schritt verzerrten wir jedes einzelne Gesicht unserer Datenbank dergestalt, dass all seine Formmarkierungen genau mit denen des Durchschnittsgesichts zusammenfielen. Die dabei entstandenen Abbildungen repräsentierten die formunabhängige Erscheinung des Gesichts.

Eine simple Gleichung

Die Datensätze untersuchten wir dann mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse. Diese mathematische Methode ermittelt jene Merkmale, die in einem komplexen Datensatz am stärksten variieren. Mit den jeweils 25 dominierenden Komponenten für Form und Erscheinung schufen wir einen 50-dimensionalen »Gesichtsraum«, in dem jeder Punkt ein Gesicht repräsentiert. So wie im normalen dreidimensionalen Raum jeder Punkt durch die Werte dreier Koordinaten (x, y, z) definiert ist, benötigen wir im 50-D-Gesichtsraum zur Definition einer individuellen Physiognomie 50 Koordinaten (siehe »Form + Erscheinung = Gesicht«, links).

Achsen im Gesichtsraum

Mit 50 Koordinaten für Form und Erscheinungsbild lassen sich die Reaktionen von Neuronen auf Gesichter beschreiben. Als Antwort auf ein individuelles Gesicht (rot umrandet) feuert ein Neuron mit einer bestimmten Intensität, die auf seiner präferierten Achse im Gesichtsraum stetig zunimmt. Auf der rechtwinklig dazu stehenden Achse reagiert die Zelle auf alle Gesichter stets identisch, selbst wenn diese sehr unterschiedlich aussehen (rechts). Dieses Achsenmodell der Gesichtscodierung unterscheidet sich grundlegend von einem früheren exemplarischen Modell, dem zufolge jedes Neuron auf individuelle Gesichter mit variabler Intensität antwortet.



CHANG, L., TSAO, D.Y.: THE CODE FOR FACIAL IDENTITY IN THE PRIMATE BRAIN. CELL 169, 2017, FIG. 5A, MODIFIZIERT VON JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Wir zogen nun eine Stichprobe von 2000 Porträts und präsentierten sie einem Affen, während wir die Zellaktivitäten aus zwei Face-Patches aufzeichneten. Dabei zeigte sich, dass praktisch alle untersuchten Neurone graduell – also rampenförmig zu- oder abnehmend – auf die Variation einer Teilmenge unserer 50 Dimensionen reagierten. Das bestätigte meine früheren Beobachtungen mit den verzerrten Comics. Doch nun gewannen wir eine wesentlich genauere Vorstellung davon, was das bedeutet.

Wenn nämlich eine Gesichtszelle graduell auf die Veränderung verschiedener Merkmale anspricht, lässt sich ihre Antwort auf ein Porträt anhand der gewichteten Summe der Reaktionen auf die Einzelmerkmale beschreiben. Dabei ist die Gewichtung jedes Merkmals durch die Steigung der zugehörigen Funktion bestimmt. Mit anderen Worten:

Reaktion einer Gesichtszelle =
Gewichtungsmatrix \times 50 Gesichtsmerkmale

Kehren wir diese Gleichung um, können wir aus der Reaktion der Gesichtszellen *vorhersagen*, welches Gesicht das Tier gerade sieht:

50 Gesichtsmerkmale =
Reaktion der Gesichtszellen / Gewichtungsmatrix

Diese Gleichung erschien uns zunächst als zu simpel. Zum Test ermittelten wir aus den Reaktionen auf 1999 der 2000 Gesichter die Gewichtungsmatrix und versuchten daraus, die 50 Merkmale des einen nicht gezeigten Porträts abzuleiten. Zu unserem Erstaunen war das hiermit vorhergesagte Gesicht von dem tatsächlichen praktisch nicht zu unterscheiden (siehe »Treffende Vorhersage«, unten).

Unsere Erkenntnisse stellte ich bei einer Konferenz im schweizerischen Ascona vor. Nach meinem Vortrag fragte

mich Rodrigo Quian Quiroga, heute an der englischen University of Leicester, wie unsere Gesichtszellen zu seinem Konzept passen, dem zufolge einzelne Neurone selektiv auf bestimmte Gesichter ansprechen. 2005 hatte er im medialen Schläfenlappen jene viel diskutierte Jennifer-Aniston- oder Großmutterzelle entdeckt, ein hypothetisches Neuron, das ausschließlich auf das Gesicht einer bekannten Person reagiert wie das eines Prominenten oder eines Verwandten.

Ich antwortete Rodrigo, unserer Zellen seien vielleicht die Vorläufer seiner Neurone, ohne groß darüber nachzudenken. Doch als ich nachts darauf auf Grund des Jetlags wach lag, wurde mir plötzlich der fundamentale Unterschied zwischen unseren und seinen Gesichtszellen klar. In meinem Vortrag hatte ich ja beschrieben, wie sich die Reaktion unserer Neurone aus der gewichteten Summe verschiedener Gesichtsmerkmale ergibt. Nun erkannte ich, dass diese Berechnung der mathematischen Operation eines Skalarprodukts entspricht. Dabei handelt es sich um die geometrische Projektion eines Vektors auf eine Achse, so wie die Sonne den Schatten einer Fahnenstange auf den Boden projiziert.

Eine Wette, die man nicht verlieren kann

Wie ich in linearer Algebra an der High School gelernt hatte, sollte es damit möglich sein, einen großen »Nullraum« für jede Gesichtszelle zu konstruieren – also eine Serie von Gesichtern unterschiedlicher Identität, die auf einer Achse senkrecht zur Projektionsachse liegen. Dadurch sollte die Zelle auf all diese Gesichter exakt gleich antworten (siehe »Achsen im Gesichtsraum«, S. 35). Das wiederum bedeutete, dass sich die Zellen der Face-Patches von Großmutterzellen grundlegend unterscheiden. Und damit wäre ebenfalls die verbreitete Annahme widerlegt, Gesichtsneurone seien auf das Erkennen spezifischer einzelner Gesichter abgestimmt.

Treffende Vorhersage

Für ein gegebenes Gesicht können wir anhand der gewichteten Summe der Werte aller 50 Gesichtskordinaten vorhersagen, wie ein bestimmtes Neuron reagiert. Um nun umgekehrt aus der neuronalen Aktivität abzuleiten, welches Gesicht ein Affe gesehen hat, kehren wir den Prozess um: Aus den Reaktionen von 205 Gesichtszellen können wir die zugehörigen Werte für die 50 Koordinaten des Gesichtsraums ermitteln – und damit das gesehene Gesicht sehr genau rekonstruieren.



Am nächsten Morgen um 5 Uhr kam ich als Erste in den Frühstückraum, um Rodrigo von meiner Vermutung zu berichten, die doch der Intuition stark zuwiderlief. Als er dann endlich auftauchte, erzählte mir Rodrigo, er sei auf exakt dieselbe Idee gekommen. Also schlossen wir eine Wette, wobei Rodrigo die Bedingungen generös so gestaltete, dass ich gar nicht verlieren konnte: Sollte sich herausstellen, dass jede Zelle wirklich gleichartig auf einen Satz verschiedener Gesichter reagiert, würde ich Rodrigo eine teure Flasche Wein schicken. Sollte sich das als falsch erweisen, bekäme ich zum Trost von ihm eine Flasche.

Zu Hause in unserem Labor kartierte Le Chang zunächst die bevorzugte Achse einer einzelnen Zelle anhand ihrer Reaktionen auf die 2000 Porträts. Dann erzeugte er, während er weiterhin die Aktivität derselben Zelle aufzeichnete, eine Reihe von Gesichter, die alle auf einer Achse senkrecht zur bevorzugten Achse der Zelle lagen. Tatsächlich lösten all diese Antlitze exakt dieselbe Reaktion aus. In der nächsten Woche erhielt Rodrigo eine Flasche vom feinsten Cabernet Sauvignon.

Das Experiment belegte, dass Gesichtszellen im inferioren temporalen Kortex nicht die Identität bestimmter Personen codieren. Stattdessen führen sie eine Achsenprojektion durch – arbeiten also viel abstrakter.

Analog nehmen wir zum Beispiel Farben wahr: Diese lassen sich konkret benennen wie Smaragdgrün, Dottergelb oder Azurblau. Alternativ kann man sie anhand von drei Zahlen codieren, welche die Mengen an Rot, Grün und Blau repräsentieren, aus denen sich der jeweilige Farbton zusammensetzt. Dabei sollte eine Farbzelle, die eine Projektion auf die Rotachse durchführt, elektrische Impulse proportional zum Rotanteil auslösen. Eine solche Zelle feuerte mit derselben Intensität, wenn sie einen braunen oder gelben Fleck mit demselben Rotanteil registriert. Gesichtszellen arbeiten nach genau diesem Schema, nur dass sie 50 statt drei Achsen verwenden. Und statt Unterschieden in der Menge an Rot, Grün oder Blau codiert eine derartige Achse die Abweichungen in Form und Erscheinungsbild von einem Durchschnittsgesicht.

Anscheinend gibt es also keine Jennifer-Aniston-Zelle, zumindest nicht im IT-Kortex. Einzelne Neurone, die selektiv auf die Züge bestimmter vertrauter Individuen ansprechen, könnten jedoch in anderen Hirnteilen aktiv sein, welche die von Gesichtszellen ausgegebenen Daten weiterverarbeiten. Hirnregionen wie der Hippocampus, die Gedächtnisinhalte speichern, könnten Zellen enthalten, die eine Person wiedererkennen helfen, der man früher einmal begegnet ist. Sie ähnelten dann tatsächlich den populären Großmutterzellen.

Die Gesichtserkennung im IT-Kortex basiert demnach auf einem Satz von etwa 50 Zahlen, die Form und Erscheinung eines Gesichts entlang einer entsprechenden Anzahl von Achsen darstellen. Die Entdeckung dieses äußerst einfachen Codes für die Identität von Gesichtern wirkt sich maßgeblich auf unser Verständnis für die visuelle Wahrnehmung aus. Es ist durchaus möglich, dass der gesamte IT-Kortex nach diesem Prinzip organisiert ist, in dem Gruppen von Neuronen auf einem Achsensatz Werte codieren, die zusammen das Objekt repräsentieren.

Falls Sie schon einmal im British Museum waren, haben Sie bestimmt den Stein von Rosetta bewundert. Auf dieser Felstafel ist ein Dekret aus Memphis in drei verschiedenen Sprachen eingraviert: in ägyptischen Hieroglyphen, in Demotisch sowie in Altgriechisch. Da Philologen das Altgriechische beherrschen, konnten sie mit den Inschriften des Rosettasteins den Code der ägyptischen Hieroglyphen und der demotischen Schrift knacken. In ähnlicher Weise bilden Gesichter, Face-Patches und der IT-Kortex als Ganzes einen neuronalen Rosettastein, den es noch zu entschlüsseln gilt. Indem wir unseren Affen Porträts zeigten, entdeckten wir die Face-Patches und fanden heraus, wie die Neurone in diesen Zonen Gesichter erkennen und identifizieren. Das Verständnis der Codierungsregeln der Face-Patches könnte uns einen Einblick in die Organisation des gesamten IT-Kortex erlauben und enthüllen, wie Objektidentitäten überhaupt codiert werden. Möglicherweise enthält der IT-Kortex weitere, auf die Verarbeitung anderer Objekttypen spezialisierte Netzwerke – wie ein Computer mit zahlreichen Prozessoren.

Von der Wahrnehmung der Realität zur reinen Imagination

Auf Basis unserer Erkenntnisse zur Funktion der Face-Patches können wir nun Affen trainieren, sich Gesichter lediglich vorzustellen, um dann zu untersuchen, welche neuronalen Aktivitätsmuster der Akt der Imagination hervorbringt. Dabei ergeben sich etliche neue Fragen: Reaktiviert die bildliche Vorstellung das neuronale Muster des imaginierten Konterfeis in den Face-Patches? Reaktiviert sie eventuell auch die vorgeschalteten Repräsentationen von Konturen und Schattierungen, die Daten an das System der Gesichtsareale liefern? Wir verfügen jetzt über das nötige Werkzeug, um diesen Fragen nachzugehen und besser zu verstehen, wie das Gehirn Objekte wahrnimmt, egal ob real oder imaginiert.

Fast alle essenziellen Funktionen des Gehirns – Bewusstsein, visuelles Gedächtnis, Entscheidungsfindung oder Sprache – erfordern Interaktionen mit Objekten. Ein tieferes Verständnis der Objektwahrnehmung wird uns daher helfen, Einblicke in die Funktionen des gesamten Gehirns zu gewinnen, nicht nur in die des visuellen Kortex. Wir haben gerade erst begonnen, die Rätsel der Gesichtswahrnehmung zu lösen. ◀

QUELLEN

Chang, L., Tsao, D.Y.: The code for facial identity in the primate brain. *Cell* 169, 2017

Freiwald, W.A., Tsao, D.Y.: Functional compartmentalization and viewpoint generalization within the macaque face-processing system. *Science* 330, 2010

Quiian Quiroga, R.: How do we recognize a face? *Cell* 169, 2017

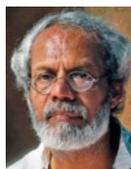
LITERATURTIPP

Abbott, A.: Die Gesichtsspezialistin. *Gehirn&Geist* 6/2019, S. 46–51

»Nature«-Redakteurin Alison Abbott stellt Doris Tsao vor.

BIODIVERSITÄT VERGESSENE KÖRNER

Die einen sind besonders nährstoffreich, die anderen können Überschwemmungen, Dürren oder anderen Katastrophen trotzen: Viele alte Reissorten sind hochinteressant – und fast vergessen. Sie zu erhalten und wieder anzusiedeln, stellt Forscher vor Herausforderungen.



Debali Deb leitet das Zentrum für interdisziplinäre Studien in Barrackpur nördlich von Kalkutta. Er hat die Basudha-Farm zur Erhaltung der Reispflanzenvielfalt und das Vrihi-Saatgutverteilzentrum im indischen Dorf Kerandiguda gegründet.

► spektrum.de/artikel/1736686

► An einem heißen Sommertag im Jahr 1991 untersuchte ich in stundenlanger Arbeit die Biodiversität »heiliger Haine« im Süden des indischen Bundesstaats Westbengalen. Um mich auszuruhen, ging ich zur Hütte eines jungen Mannes vom Santal-Stamm, Raghu Murmu. Im Schatten eines riesigen Mangobaums genoss ich kaltes Wasser und aus Reis hergestellte Süßigkeiten. Seine schwangere Frau sah ich eine rötliche Flüssigkeit trinken. Dabei handle es sich um Stärke, die beim Kochen von Reis der Sorte Bhutmuri frei werde, erklärte Raghu. »Bei Frauen, die während der Schwangerschaft und nach der Geburt unter Blutarmut leiden, unterstützt das die Blutbildung«, erläuterte er mir. Vermutlich auf Grund seiner rotbraun gefärbten Deckspelze (siehe »Eine Fülle an Reissorten«, S. 42) trägt diese Sorte den Namen Geisterkopf-Reis.

Wie ich später herausfinden sollte, gehört Bhutmuri zu einer von mehreren einheimischen Reissorten in Südasien, die reich an Eisen sind und bestimmte B-Vitamine enthalten. Paramai-sal-Reis wiederum beherbergt große Mengen an Antioxidanzien, Mikronährstoffen und löslicher Stärke, die rasch in Energie umgewandelt werden kann. Damals waren mir solche ungewöhnlichen Reissorten mit ihren eindrucksvollen Namen und volksmedizinischen Anwendungen neu. Zurück in Kalkutta, führte ich eine Literaturrecherche zur genetischen Vielfalt von indischem Reis durch und stellte fest, dass meine Begegnung mit Raghu ein Glücksfall gewesen war. Bauern wie er, die alte Reissorten anbauen und deren Wert zu schätzen wissen, sind sehr selten – und die Reissorten gefährdet.

In den Jahren darauf habe ich eine Fülle einheimischer Reissorten (auch als Landrassen bezeichnet) kennen gelernt, die über erstaunlich nützliche und vielfältige Eigen-

schaften verfügen. Einige können Überflutungen, Trockenheit, hohen Salzkonzentrationen im Boden oder Schädlingsattacken trotzen, manche sind reich an wertvollen Vitaminen oder Mineralstoffen, und wieder andere sind mit einer attraktiven Farbe, einem verführerischen Geschmack oder einem verlockenden Duft ausgestattet, so dass ihnen bei religiösen Zeremonien eine besondere Rolle zukommt. Diese ausgesprochen seltenen, aber wertvollen Sorten zu sammeln, wieder anzubauen und den Bauern zugänglich zu machen, ist mir mittlerweile zur Lebensaufgabe geworden.

Der asiatische Kulturreis (*Oryza sativa*) ist das Ergebnis jahrhundertelanger Selektion und Züchtung aus alten Wildsorten – ein Prozess, den Charles Darwin als künstliche Selektion bezeichnete. Archäologische und genetische Nachweise deuten darauf hin, dass die asiatische Reis-Untersorte *Indica* (zu der nahezu alle auf dem indischen Subkontinent kultivierten Reissorten gehören) vor etwa 7000 bis 9000 Jahren in den Gebirgsausläufern des östlichen Himalaja angebaut wurde. In den darauf folgenden Jahrtausenden der Domestizierung und Kultivierung schufen traditionelle Bauern eine Fülle von Landrassen, die perfekt an die unterschiedlichen Böden, Topografien und Mikroklimata sowie die spezifischen kulturellen, ernährungsphysiologischen oder medizinischen Bedürfnisse angepasst waren.

Dramatischer Schwund

Laut dem Reiswissenschaftler R. H. Richharia, dem ehemaligen Direktor des Central Rice Research Institute in Cuttack in Indien und einem Pionier auf diesem Gebiet, wurden bis in die 1970er Jahre hinein auf indischen Feldern mehr als 140000 Landrassen angebaut. Zieht man synonyme Bezeichnungen (also identische Sorten, die lokal verschiedene Namen tragen) ab, bleiben immer noch etwa 110000 unterschiedliche Sorten. Wie ich seit meiner Literaturrecherche weiß, hat sich die genetische Vielfalt der indischen Reissorten seit der Grünen Revolution in den 1970er Jahren allerdings drastisch verringert.

Ende der 1960er Jahre stellte das International Rice Research Institute (IRRI) der indischen Regierung einige speziell gezüchtete Hohertragsorten (high-yielding varieties, HYVs) zur Verfügung, die – bei guter Wasserversor-



Traditionelle Reissorten bieten eine Fülle an wertvollen Eigenschaften. Doch es gibt nur noch wenige von ihnen.

gung sowie unter Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden – beträchtliche Erträge lieferten. In Absprache mit internationalen Entwicklungsbehörden drängte das IRRI darauf, die indigenen Sorten auf allen Bodentypen durch die importierten zu ersetzen, unabhängig von ihrer Lage und den lokalen klimatischen Bedingungen. Die neuen Reissorten, stark beworben und den Bauern teils regelrecht aufgezwungen, verdrängten rasch die Landrassen.

Ende der 1970er, Anfang der 1980er Jahre listeten Wissenschaftler des IRRI 5556 Landrassen in Westbengalen auf und sammelten 3500 davon für ihre Genbank. Als ich im Jahr 1994 keinerlei Dokumentation zu den im Land noch erhaltenen Sorten fand, begann ich auf eigene Faust, eine Erhebung anzustellen. Nachdem ich dieses einsame Unterfangen 2006 endlich fertig gestellt hatte, zeigte sich, dass rund 90 Prozent der ursprünglich 110 000 von Richharia dokumentierten Sorten inzwischen von den Feldern der Bauern verschwunden waren. Tatsächlich werden in ganz Indien wahrscheinlich nur noch etwa 6000 traditionelle Reissorten angebaut. Ähnlich ist die Lage im Nachbarland: So dokumentierte das Reis-Forschungsinstitut in Bangladesch (Bangladesh Rice Research Institute) zwischen 1979 und 1981 zwar noch 12 479 Sorten namentlich. Meine Analyse einer aktuellen Studie hingegen deutet darauf hin, dass im gesamten Land maximal noch 720 Landrassen angebaut werden.

Der massive Verlust an biologischer Vielfalt auf dem indischen Subkontinent schockierte mich. Warum gab es den landwirtschaftlichen Institutionen keinen Anlass zur Sorge, dass das bedeutendste Getreide allmählich seinen genetischen Reichtum verlor? Schließlich sollte spätestens seit der Großen Hungersnot in Irland zwischen 1845 und 1849 bekannt sein, welche verheerenden Folgen solch eine Entwicklung haben kann.

Die meisten in Irland angebauten Kartoffeln gehörten damals zu einer einzigen Sorte namens Irish Lumper. Diese war nicht resistent gegen den Mikroorganismus *Phytophthora infestans*, der die Kartoffelfäule hervorruft. Als dann 1846 drei Viertel der Ernte durch Infektion mit diesem Erreger verloren gingen, fehlten in den nächsten Jahren

Pflanzkartoffeln, was dramatische Auswirkungen hatte: Während der Hungersnot starben rund eine Million Menschen an Hunger oder Krankheiten, und in dem durch Hunger und Entbehrung gekennzeichneten anschließenden Jahrzehnt wanderten etwa zwei Millionen Menschen aus Irland nach Nordamerika und Australien aus.

Monokulturen sind für eine langfristige Ernährungssicherheit katastrophal, weil der Mangel an unterschiedlichen Sorten eine Nutzpflanze anfällig für Schädlinge und Krankheiten macht, wie das dramatische Beispiel Irland deutlich zeigt. Und im Zuge der Grünen Revolution vernichteten Insekten wie Blattkäfer (etwa *Diuraphis armigera*) und die Braune Reiszikade, die zuvor nie ein Problem dargestellt hatten, in mehreren asiatischen Ländern ganze Reisernten.

Riesige Monokulturen bescheren bestimmten Schädlingen einen reich gedeckten Tisch. Gehen die Landwirte großzügig mit Pestiziden gegen sie vor, werden deren natürliche Feinde dadurch letztendlich ebenso getötet. Im Endeffekt fördert dies Vielfalt und Fülle der Schädlinge, so dass immer mehr Pestizide eingesetzt werden müssen. Und die genetische Vereinheitlichung der Getreidesorten – insbesondere derer, die im Zuge der Grünen Revolution auf Grund ihres hohen Ertrags ausgewählt wurden – bedeutet gleichzeitig, dass die Pflanzen nicht mehr über die Ausstattung verfügen, die sie gegen die Launen des Wetters schützt, wie etwa nicht ausreichenden oder verzögerten Regen, saisonale Überschwemmungen oder Sturmfluten. Die mangelnde Widerstandskraft der Pflanzen macht außerdem Landwirte, die sich beispielsweise keine Pumpen zur Be- oder Entwässerung ihrer Felder leisten können, anfälliger gegenüber umweltbedingten Änderungen.

Weil das Wissen verschwindet, sind Bauern abhängiger von Lieferanten

Mit dem Verlust der Landrassen schwindet auch das mit ihrem Anbau verbundene Wissen. So können traditionelle Bauern einzelne Sorten anhand verschiedenster Kriterien unterscheiden – etwa ihrer Blütezeit, der Farbe der basalen Blattscheide, des Winkels, in dem das oberste Blatt unterhalb des Blütenstands am Halm sitzt, der Rispenlänge oder der Größe, Farbe und Form des Kornes (siehe »Eine Fülle an Reissorten«, S. 42). Anhand dieser und weiterer Charakteristika sortieren sie alle atypischen oder abweichenden Pflanzen aus, um die genetische Reinheit der Landrasse zu erhalten. Weil sich heute die meisten südasiatischen Bauern allerdings auf die Versorgung mit fremdem Saatgut verlassen, erübrigt sich die Notwendigkeit, die Reinheit des heimischen Saatguts zu erhalten. Steht eine lokale Sorte nicht länger zur Verfügung, verschwindet daher das Wissen hinsichtlich ihres landwirtschaftlichen und kulturellen Nutzens aus dem gemeinschaftlichen Gedächtnis. Jahrtausendealte Strategien, Schädlinge und Krankheiten durch biologische Vielfalt in Schach zu halten, wurden so durch die Ratschläge von Pestizidhändlern ersetzt – auf Kosten der Boden- und Wasserqualität, der Biodiversität und der menschlichen Gesundheit.

Die Grüne Revolution hatte schwer wiegende soziale und ökonomische Auswirkungen. Um die steigenden Kosten für Betriebsmittel wie Saatgut, Düngemittel, Pestizide und

AUF EINEN BLICK VERLORENE VIelfALT

- 1** In Indien gab es ursprünglich rund 110 000 einheimische Reissorten mit unterschiedlichen wertvollen Eigenschaften, etwa einem hohen Nährstoffgehalt oder bestimmten Resistenzen.
- 2** Seit dem Siegeszug der Hochleistungssorten sind etwa 90 Prozent der ursprünglichen Sorten verschwunden.
- 3** Mit einer Farm zur Erhaltung der Reispflanzenvielfalt und einem Saatgutverteilzentrum will der Autor die verlorene Biodiversität der Kulturpflanze zumindest teilweise wiederherstellen.



FOTO: ZOE SAVITZ

Um vergessene Landrassen wieder zurückzugewinnen, müssen jedes Jahr mehr als 1000 Reissorten ausgesät, gepflegt und geerntet werden. Hier bestückt eine einheimische Bäuerin auf der vom Autor gegründeten Basudha-Reisplantage ein geflutetes Feld mit Setzlingen.

Treibstoff für Bewässerungspumpen aufbringen zu können, liehen sich Bauern Geld, oft von privaten Geldgebern. Verschuldungen, verbunden mit sinkenden Preisen für die eingebrachten Ernten, haben zu Notverkäufen kleiner landwirtschaftlicher Betriebe geführt – und zu einer epidemischen Selbstmordrate unter indischen Bauern. Während meiner jahrzehntelangen Zusammenarbeit mit traditionellen Bauern, die auf ihren kleinen Ländereien immer noch lokale Reis- und Hirsesorten anbauen, habe ich dagegen noch von keinem einzigen Selbstmord gehört.

1996 hatte ich 152 Landrassen in meiner Sammlung und wandte mich damit an die Reisforschungsstation der westbengalischen Landesdirektion für Landwirtschaft, wo alle Keimplasmen ursprünglicher Reissorten aufbewahrt werden sollten. Dort lehnte man es nicht nur ab, das von mir gesammelte Saatgut anzunehmen und zu erhalten, sondern beschimpfte mich regelrecht: Der Anbau alter Landrassen verdamme die Bauern zu geringer Produktivität und lebenslanger Armut. Als ich argumentierte, dass keine der Hochertragsorten ohne künstliche Bewässerung auf trockenen Böden, im Tiefland-Anbau oder auf küstennahen salzhaltigen Böden überleben könne, versicherte man mir, dass es bald geeignete moderne transgene Sorten geben würde und ich die Angelegenheit den Experten der Agrarwissenschaft überlassen solle.

Als ausgebildeter Ökologe, spezialisiert auf Ökosystemstrukturen und -funktionen, arbeitete ich mit dem Regionalbüro Ost des WWF Indien zusammen. Damals beschäftigten sich dieser und andere Naturschutzverbände typischerweise mit dem Artenschutz großer, faszinierender Tiere wie dem Tiger. Kulturpflanzen fallen nicht in diese Rubrik, und so lag deren Schutz nicht in ihrem Fokus. Und auch Forschungsinstitute waren an dem Thema nicht interessiert, da der Erhalt traditioneller Getreidesorten keine Aussicht auf finanzielle Unterstützung hatte.

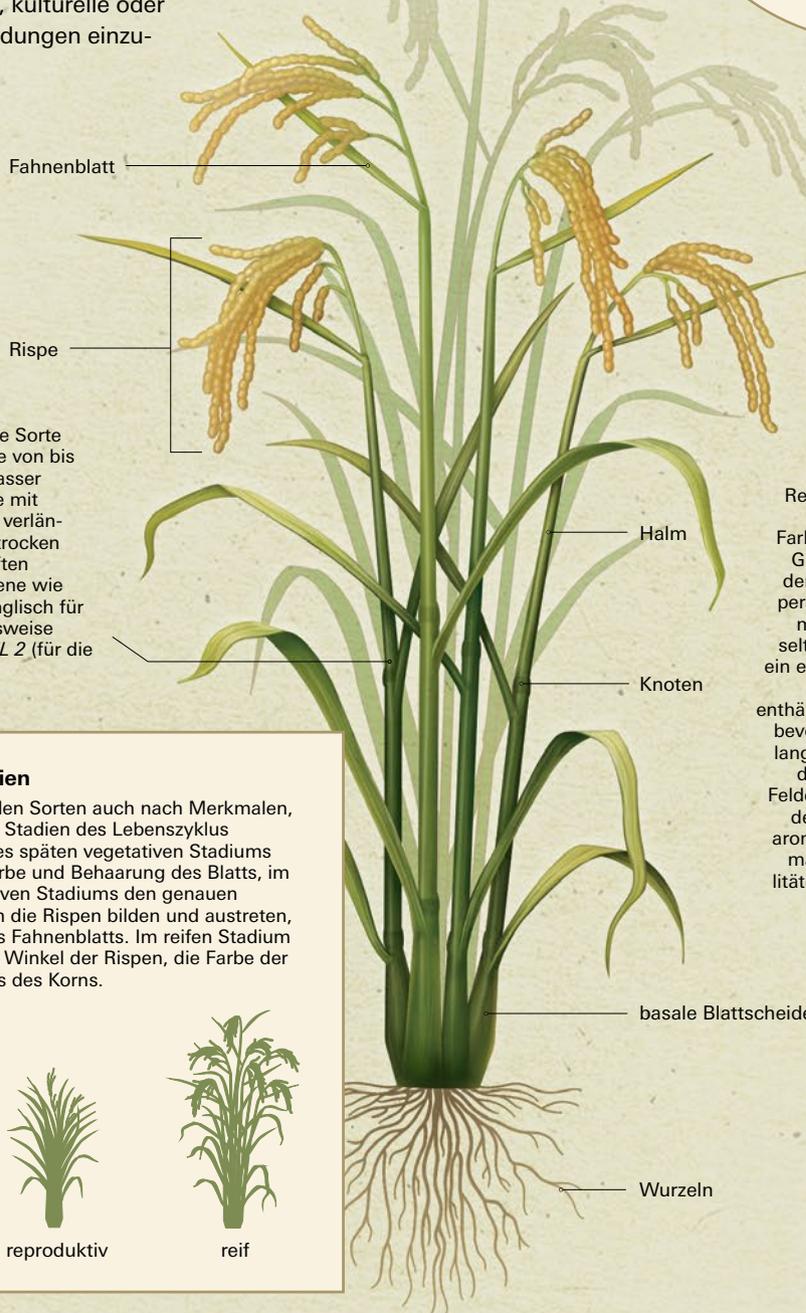
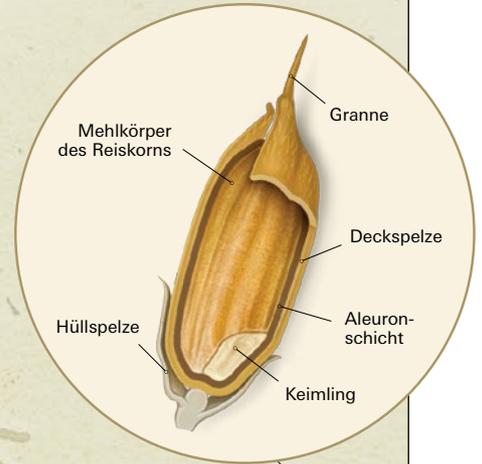
So blieb mir einzig die Möglichkeit, mein Vorhaben allein anzugehen. 1996 kündigte ich meinen Job und ließ mich in einem Ort in Westbengalen nieder, um eine Saatgutbank für einheimische Reissorten mit angeschlossenem Tauschzentrum für die Bauern aufzubauen. Im Jahr 1997 taufte ich sie auf den Namen Vrihi, was in Sanskrit so viel bedeutet wie »Reis-Verteilzentrum«. In den ersten Jahren setzte ich meine Ersparnisse ein und erhielt beträchtliche Unterstützung von der Navdanya-Stiftung, einer in Neu-Delhi ansässigen Nichtregierungsorganisation, um seltenes Saatgut aus verschiedenen Teilen des Landes zu sammeln und kostenlos an bedürftige Bauern abzugeben. Seit 2000 stammen unsere Finanzmittel größtenteils von Freunden und Förderern.

Seltene Sorten mit überraschenden Fähigkeiten

1999 erfasste ich im Norden Bengalens für die staatliche Forstbehörde Daten zur Biodiversität und nutzte diese Gelegenheit dazu, die Felder der Region zu untersuchen. Nach einer sechsstündigen Reise zu dem abgelegenen Ort Lataguri sammelte ich die stark gefährdete Reissorte Agni-sal ein. (Als stark gefährdet definiere ich eine Sorte, die nur noch auf einem einzigen landwirtschaftlichen Betrieb angebaut wird.) Das Korn war feuerrot – »Agni« bedeutet Feuer – und der Halm kräftig genug, um Stürmen zu widerstehen. Dieses Saatgut gab ich in der nächsten Saison einem Bauern, der eine Sorte suchte, die auf seiner hoch gelegenen und ständig starkem Wind ausgesetzten Anbaufläche gut gedeihen konnte. Im darauf folgenden Jahr bedankte er sich mit breitem Lächeln, denn trotz eines Wirbelsturms, der alle benachbarten Betriebe verwüstet hatte, konnte er eine reiche Ernte einfahren. Ein Jahr später überredete ihn jedoch ein Beamter der lokalen Landwirtschaftsbehörde, Agni-sal gegen eine Hochertragsorte zu ersetzen. Damit ging diese Sorte aus unserem Bestand verloren. Ich eilte zwar sofort nach Lataguri, um von dem ursprünglichen Saatgutgeber

Eine Fülle an Reissorten

Traditionelle Landwirte in Südasien können Tausende von Reissorten voneinander unterscheiden, indem sie mehr als 50 Merkmale sorgfältig untersuchen. Dazu zählen zeitliche Aspekte, wie beispielsweise die Blütezeit oder die Dauer der Reifung. Ebenso wichtig sind physische Eigenschaften wie die Länge, Größe und Farbe der Rispen, der Winkel des Fahnenblatts, die Länge, Dicke und Farbe des Halms, die Größe, Form und Farbe des Korns, die Knotenfarbe und andere Kriterien. Dieses Fachwissen, das – wie die alten Reissorten selbst – ernsthaft gefährdet ist, ermöglicht es den traditionellen Landwirten, Sorten für den Einsatz in verschiedenen ökologischen Nischen wie im Gelände abfallenden Trockengebieten oder im häufiger überfluteten Tiefland-Anbau auszuwählen oder aber für spezifische ernährungsphysiologische, kulturelle oder medizinische Anwendungen einzusetzen.

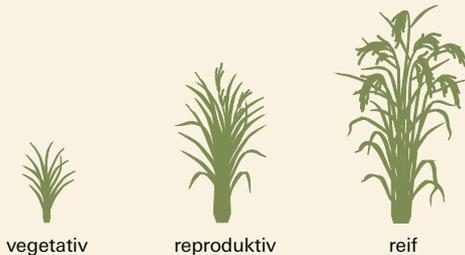


Eine hochwasserresistente Sorte kann entweder eine Phase von bis zu zwei Wochen unter Wasser tolerieren oder ihre Halme mit steigendem Wasserstand verlängern, so dass die Rispen trocken bleiben. Diese Eigenschaften bestimmen spezifische Gene wie *SUB1* (für »submerge«, englisch für untertauchen) beziehungsweise *SNORKEL 1* und *SNORKEL 2* (für die Halmverlängerung).

Reiskörner können in der Länge der Granne, der Farbe der Deckspelze, der Größe, Farbe, Form und dem Aroma des Mehlkörpers sowie anderen Merkmalen variieren. Es gibt seltene Sorten, bei denen ein einziges Korn zwei oder sogar drei Mehlkörper enthält. Traditionelle Bauern bevorzugen oft Sorten mit langen, scharfen Grannen, die eine Beweidung der Felder durch Rinder verhindern sollen. Aus einigen aromatischen Sorten stellt man kulinarische Spezialitäten für Zeremonien her.

Entwicklungsstadien

Landwirte unterscheiden Sorten auch nach Merkmalen, die nur in bestimmten Stadien des Lebenszyklus auftreten. Während des späten vegetativen Stadiums beobachten sie die Farbe und Behaarung des Blatts, im Verlauf des reproduktiven Stadiums den genauen Zeitpunkt, zu dem sich die Rispen bilden und austreten, sowie die Neigung des Fahnenblatts. Im reifen Stadium unterscheiden sie den Winkel der Rispen, die Farbe der Granne und die Details des Korns.



eine weitere Probe zu beschaffen, jedoch nur um zu erfahren, dass er im Jahr zuvor verstorben und sein Sohn diese Sorte Reis aufgegeben hatte. Agni-sal ist demzufolge meines Wissens nach unwiderruflich ausgestorben.

Ein weiterer Vorfall etwa zu der gleichen Zeit überzeugte mich davon, dass es nicht ausreicht, Saatgut nur zu sammeln und weiterzugeben. Traditionelle indische Tiefland-Bauern bauen normalerweise zwei Typen von überflutungstolerantem Reis an. Der eine kann sich dem steigenden Wasserspiegel durch eine Halmverlängerung unter Wasser anpassen. Diese Eigenschaft regulieren zwei Gene namens *SNORKEL1* und *SNORKEL2*, die auf Chromosom 12 liegen. Zu dem Typ zählen traditionelle Sorten wie Lakshmi dighal, Jabrah, Pantara und Rani kaja. Ein zweiter Typ kann eine auch länger andauernde vollständige Überflutung überstehen. Eines der hierfür verantwortlichen Gene ist *SUB1*, das in mehreren bengalischen Landrassen vorkommt.

Im Juni 1999 wurde ein südlicher Distrikt von Westbengalen von einer sintflutartigen Sturzflut heimgesucht, der die gesamte Reisernte zum Opfer fiel. Zu jener Zeit hatte ich keine überflutungstoleranten Sorten in meiner Saatgutbank, wusste aber, dass das IRRI und die Nationale Behörde für pflanzengenetische Ressourcen (National Bureau of Plant Genetic Resources) in Neu-Delhi mehrere Dutzend davon besaßen. Beide Institutionen schrieb ich mit der Bitte an, mir 10 bis 20 Gramm dieses Saatguts zu schicken, um die notleidenden Bauern zu retten, jedoch ohne Reaktion.

Dagegen stellen die Genbanken ihre Bestände Saatgutunternehmen für Hybridisierungsprogramme und Patentanmeldungen zur Verfügung. Laut Schätzungen des International Food Policy Research Institute wurden bis 1996 etwa drei Viertel der US-amerikanischen Reisfelder mit Saatgut aus Beständen der IRRI-Sammlung bestückt. Und 1997 erteilte das US-amerikanische Patentamt dem in Texas ansässigen Unternehmen RiceTec das bislang umfangreichste Patent auf eine indigene Reissorte, und zwar für einen hybriden Basmati-Reis, dessen Vorfahren aus Südasien und der IRRI-Sammlung stammen (siehe »Umstrittenes Biopatent«, rechts). Das Institut, das seinen Bestand angeblich treuhänderisch für die Landwirte weltweit verwaltet, meldete 2004 selbst ein internationales Patent auf ein ertragssteigerndes Reisgen namens *SPIKE* an, das in der indonesischen Landrasse Daringan entdeckt wurde. Der Aufsichtsrat des Internationalen Abkommens über pflanzengenetische Ressourcen für Ernährung und Landwirtschaft (International Treaty on Plant Genetic Resources for Food and Agriculture, ITPGRFA) hat die Rechtmäßigkeit dieser umstrittenen Anwendung untersucht, aber bisher noch keine Entscheidung bekannt gegeben.

Die »Ex-situ«-Saatgutbanken, die sich außerhalb des eigentlichen Anbaugebiets befinden, sind nicht nur physisch und sozial weit weg von den Bauern, ihr Saatgut ist durch die lange Isolation auch nur eingeschränkt nutzbar. Die Reissamen werden getrocknet und bei minus 20 Grad Celsius gelagert, wodurch sie bis zu 35 Jahre lang lebensfähig bleiben. In eingefrorenem Zustand entfernen sie sich aber zunehmend von den Lebensformen in der realen Welt, da diese sich ständig weiterentwickeln. Werden die konservierten Sorten dann nach 35 Jahren ausgesät, fehlen ihnen

Umstrittenes Biopatent

Im Jahr 1997 meldete das US-amerikanische Unternehmen RiceTec ein Patent auf einen Basmati-Reis an, den es aus Kreuzungen hergestellt hatte. Das Patent beinhaltete nicht nur neue Reislinien, sondern auch die exklusive Verwendung des Namens »Basmati-Reis«. Das Vorgehen rief weltweit Proteste hervor, weil traditionelle Bauern um ihre Lebensgrundlage fürchteten. Nachdem die indische Regierung im Jahr 2000 drei der Ansprüche aus dem Patent anfocht, verzichtete RiceTec auf diese sowie einen zusätzlichen. 2001 wies das US-Patentamt 13 weitere Ansprüche zurück. Seither trägt die Firma noch das Recht an drei neuen Reislinien, die sie unter den Namen »Texmati« und »American-style basmati rice« verkaufen darf.

aller Wahrscheinlichkeit nach natürliche Resistenzen gegen spezifische Pathogene, die sich mittlerweile zu neueren Stämmen entwickelt haben. Bei den mit einem niedrigeren Budget ausgestatteten »In-situ«-Saatgutbanken direkt im Anbaugebiet ist es im Gegensatz dazu zwingend erforderlich, dass die Bauern ihr Saatgut jedes Jahr aussäen, damit die Samen ihre Keimfähigkeit nicht verlieren. Dank dieser Notwendigkeit entwickelt sich das dort konservierte Saatgut kontinuierlich und parallel zu den verschiedenen Pathogenen und Schädlingen weiter.

Eine Farm mit besonderen Herausforderungen

Nach einer Reihe solcher Erfahrungen und Beobachtungen beschloss ich, eine eigene Farm zur Erhaltung einer kleinen Population jeder Landrasse aufzubauen, so dass diese Sorten selbst dann überleben, wenn die Bauern sie aufgegeben haben. So gründete ich 2001 die Basudha-Farm. Dort, in einem kleinen Dorf im Süden des ostindischen Bundesstaats Odisha, bauen wir jedes Jahr diejenigen Reissorten an, die wir in Vrihi sammeln. Das sind derzeit 1420, von denen mittlerweile 182 von Indiens Feldern verschwunden sind.

Auf den uns zur Verfügung stehenden knapp 0,7 Hektar müssen wir von jeder einzelnen Sorte jeweils 64 einzelne Pflanzen auf nur vier Quadratmetern Fläche anbauen. (Zur Aufrechterhaltung aller genetischen Anlagen einer bestimmten Landrasse ist eine Mindestanzahl von etwa 50 Pflanzen nötig.) Da wir so den international empfohlenen Isolationsabstand zwischen den einzelnen Landrassen von beidseitig jeweils mindestens 110 Metern natürlich bei Weitem nicht einhalten können, ist es eine Herausforderung, Fremdbestäubung zwischen benachbarten Sorten zu vermeiden. Wir haben das Problem gelöst, indem wir die verschiedenen Sorten so pflanzen, dass sie jeweils von solchen umgeben sind, die zu einer anderen Zeit im Jahr blühen. Darüber hinaus überwachen wir gemäß den inter-

nationalen Biodiversitätsrichtlinien in jeder Population in den verschiedenen Lebensphasen 56 unterschiedliche Merkmale und sortieren abweichende Pflanzen aus. Wir gehen davon aus, dass alle unter diesen Kriterien geernteten Samen – abgesehen von wenigen unentdeckten Mutationen – zu 100 Prozent genetisch rein sind.

Auf der Basudha-Farm werden alle Landrassen in Übereinstimmung mit dem agrarökologischen Prinzip angebaut, dass keine externe Zufuhr stattfindet: keine Agrochemikalien, keine Bewässerung durch Grundwasserentnahme, keine fossilen Kraftstoffe für Maschinen. Die Versorgung mit Nährstoffen erfolgt über Blatt- und Strohmulch, Hülsenfrüchte (deren Wurzeln reich an Stickstoff fixierenden Mikroben sind), kompostierte Gründüngung sowie Tiermist, Biokohle und Bodenmikroben. Wir bekämpfen Schädlinge, indem wir »Unkräuter« und Sträucher anpflanzen, die Lebensräume für deren Fressfeinde wie Spinnen, Ameisen und Reptilien sowie Parasiten bieten. Eine weitere Strategie ist die Erhaltung von Wasserpflanzen als Brutstätten für Wasserinsekten und Frösche, die ebenfalls Jagd auf Pflanzenschädlinge machen. Und gelegentlich verwenden wir pflanzliche Schädlingsbekämpfungsmittel wie Tabak, Knoblauch und Tulsi (*Ocimum sanctum*, Heiliges Basilikum). Pflanzenkrankheiten sind auf Basudha kein Thema: Dass Sorten- und Artenvielfalt den besten Schutz bieten, wurde und wird immer wieder dokumentiert.

Einen Teil der geernteten Körner lagern wir für die Aussaat im Folgejahr in Tontöpfen, wo sie zum einen vor Insekten und Nagern geschützt sind und zum anderen »atmen« können. Den Rest verteilen wir an Bauern, im Austausch gegen eine Hand voll Saatgut anderer einheimischer Sorten, die wir anbauen und wiederum an andere Landwirte weitergeben. Mit diesem System möchten wir ganz bewusst die klassische Praxis des Saatgutaustauschs wiederbeleben, die einst in allen landwirtschaftlichen Gemeinschaften dazu beitragen hat, Getreidesorten über die Kontinente zu verbreiten.

Meine Mitarbeiter und ich haben mittlerweile mehr als 20 weitere Saatgutbanken in verschiedenen Teilen Indiens mit aufgebaut, so dass die Landwirte vor Ort Zugriff auf die von ihnen benötigten Sorten haben, ohne nach Vrihi reisen zu müssen. Außerdem fördern wir Saatgut-Tauschbörsen zwischen den Bauern. Von diesen Saatgutbanken und Netzwerken haben bislang mehr als 7800 Landwirte in fünf indischen Bundesstaaten profitiert. Darüber hinaus dokumentieren wir die Merkmale und Eigenschaften jeder einzelnen Sorte und erstellen im Namen der Bauern ein Verzeichnis aller Landrassen, um Patent-Biopiraterie zu verhindern. So versuchen wir, den Bauern die Souveränität über ihr Saatgut wiederzugeben, was für ihre langfristige Finanz- und Ernährungssicherheit unerlässlich ist.

Auf landwirtschaftlichen Betrieben in prekärer Lage, die unter Dürre oder saisonalen Überflutungen leiden, sind die traditionellen Landrassen das einzige zuverlässige Mittel, um die Ernährung zu sichern. Ich baue seit inzwischen 22 Jahren indigene Reissorten an und bin davon überzeugt, dass Landrassen wie Kelas, Rangī, Gadaba, Kaya und Velchi unter Dürrebedingungen höhere Erträge liefern als jegliche modernen Hohertragsorten. Lakshmi dighal, Rani kajal

und Jabra können mit steigendem Wasserspiegel ihre Halme verlängern und auf diese Weise die Körner tragenden Rispen bis zu einem Wasserstand von vier Metern trocken halten. Matla, Getu, Talmugur und Kallurundai wachsen selbst auf salzigen Böden und trotzen eindringendem Meerwasser. All diese Landrassen sind mit einer ganzen Reihe von Genen ausgestattet, die ihnen ein breites Spektrum an Anpassungsfähigkeiten verleihen.

Wann traditionelle Sorten punkten

Bei optimalen Bodenverhältnissen kann auf Landwirtschaftsbetrieben, die ausschließlich durch Regen bewässert werden, eine beträchtliche Anzahl indigener Reissorten wie Bahurupi, Bourani, Kerala sundari und Nagra die Erträge moderner Hochleistungssorten ausstechen. Eine Reihe ausgesprochen rarer Sorten mit relativ großen Erträgen verfügt über zwei beziehungsweise drei Mehlkörper pro Korn, was auf eine seltene Mutation in den Strukturgenen der Blütenstände zurückzuführen sein könnte. Die Basudha-Farm scheint eine der letzten Aufbewahrungsstätten einer solchen Landrasse mit drei Mehlkörpern zu sein.

Darüber hinaus besitzen mehrere Landrassen Resistenzen gegenüber Schädlingen und Pathogenen. Kalo nunia, Kalanamak, Kartik-sal und Tulsi manjari sind gegen pilzbedingten Blattbrand, Bishnubhog und Rani kajal gegen durch Bakterien verursachte Weißblättrigkeit resistent, und Kataribhog kann sich recht gut gegenüber Tungroviren behaupten, die

Der Autor Debal Deb (links) und sein langjähriger Mitarbeiter Debdulal Bhattacharya untersuchen, dokumentieren und diskutieren die detailreichen Charakteristika der geernteten Reiskörner.



weltweit bereits mehrmals für hohe Ertragseinbußen gesorgt haben. Gour-Nitai, Jashua und Shatia scheinen resistent gegenüber dem Reisblattzünsler (*Paraporyx stagnalis*) zu sein, und bei Khudi khasa, Loha gorah, Malabati, Sada Dhepa und Sindur mukhi wurden nur selten Angriffe von Reisstängelbohrern (*Tryporyza* spp.) beobachtet. Dieses von Vrihi ausgegebene Saatgut hat in den letzten rund 25 Jahren auf tausenden Feldern schädlings- und krankheitsbedingte Ernteeinbußen verringert.

Doch nicht nur die Widerstandskraft der Pflanzen ist von Bedeutung. Während sich die moderne Reiszüchtung im Wesentlichen auf eine Ertragssteigerung konzentriert, gerät völlig aus dem Blick, dass zahlreiche indigene Reissorten verschiedene wertvolle Mikronährstoffe enthalten, die den modernen Sorten fehlen. So identifizierten wir kürzlich mindestens 80 einheimische Sorten, die mehr als 20 Milligramm Eisen pro Kilogramm Reis aufweisen. Die höchsten Konzentrationen fanden wir in den Sorten Harin kajli, Dudh bolta und Jhuli: Dort lagen sie zwischen 131 und 140 Milligramm pro Kilogramm. Die unter enormem Aufwand am IRRI entwickelte transgene, extra mit Eisen angereicherte Reissorte IR68144-2B-2-2-3 enthält etwa zehnmal weniger.

Bestimmte Landrassen sind darüber hinaus eventuell von medizinischem Nutzen. Ayurveda, die traditionelle indische Heilkunst, empfiehlt Nyavara-Reis aus Kerala zur unterstützenden Behandlung einer Gruppe neurologischer Erkrankungen. Gemeinsam mit meinen Mitarbeitern untersuche ich derzeit seine chemische Zusammensetzung und hoffe, dabei etwas über seine diesbezügliche Wirksamkeit herauszufinden. Eine weitere solche Reissorte, Garibsal aus Westbengalen, wurde in der traditionellen Medizin bei Magen-Darm-Infektionen verschrieben. In einer 2017 veröffentlichten Arbeit dokumentierten meine Kollegen und ich in Garibsal-Reiskörnern eine Silber-Anreicherung in einer Konzentration von bis zu 15 ppm (parts per million). Silber-Nanopartikel töten laut einer 2017 erschienenen Studie pathogene Bakterien ab. Diese Sorte könnte also zur Bekämpfung von Krankheitserregern im menschlichen Darm beitragen. Eine ganze Fülle solch potenziell medizinisch relevanter Reissorten wartet noch darauf, im Labor und klinisch erforscht zu werden.

Die Komplexität der ökologischen Wechselwirkungen hat eine Reihe weiterer Reissorten hervorgebracht. So bevorzugen Kleinbauern in den Bundesstaaten Westbengalen und Jharkhand Sorten mit langen und kräftigen Grannen (dornartigen Fortsätzen an der Spitze der Deckspelze), die Rinder und Ziegen vom Weiden abhalten. Außerdem schätzen Bauern Landrassen mit aufgerichteten Fahnenblättern, da sich keine Vögel darauf niederlassen können, um Körner zu fressen.

Interessanterweise bauen einige Landwirte in Odisha eine Kombination aus Reissorten mit und ohne Grannen auf ihren Feldern an, unabhängig von jeglichem direktem Vorteil. Andere seltene Sorten ohne offensichtlichen Nutzen verfügen über violette Halme und Blätter. Tatsächlich scheint die südasiatische Tradition die Vielfalt auf genetischer sowie auf Artebene als so essenziell für die Landwirtschaft zu erachten, dass sie in bestimmten religiösen Ritualen früher fest verankert war. So werden beispiels-

weise einige wilde Verwandte von Kulturreisorten wie Buno dhan (*Oryza rufipogon* oder Roter Reis) und Uri dhan (*Hygroryza asiatica*) mit lokalen Hindu-Riten in Verbindung gebracht und von vielen Landwirtschaftsbetrieben in Westbengalen und dem benachbarten Jharkhand bewahrt. Solche wilden Genpools werden als Quelle ungewöhnlicher Merkmale, die bei Bedarf in vorhandene Kultursorten eingebaut werden können, immer wichtiger. Weiterhin sind auf den Reisfeldern bestimmte Bäume wie der Niembaum (*Azadirachta indica*), dessen Blätter als natürliche Pestizide wirken, und Raubvögel wie die Eule gern gesehen.

Katastrophen offenbaren die Vorteile alter Reissorten

In einer umfassenden Sammlung der alten, einheimischen Reissorten mit ihren fein abgestimmten Anpassungen sehen wir die beste Chance, bei widrigen Bedingungen die erforderliche Abhilfe zu schaffen. Überzeugt von der höheren Ertragsstabilität der Landrassen, haben mehr als 2000 Landwirte in unterschiedlichen Regionen Indiens verschiedene dieser Reissorten aus Vrihi eingeführt und den Anbau der Hohertragssorten eingestellt.

Als der Zyklon Aila im Mai 2009 auf die Küste der Sundarbans vor Westbengalen und Bangladesch traf, forderte er fast 350 Todesopfer und zerstörte die Wohnstätten von mehr als einer Million Menschen. Eine Sturmflut überschwemmte die Felder und ließ sie versalzen. Neben der unmittelbaren verheerenden Verwüstung war damit die langfristige Ernährungssicherheit der Region in Gefahr. Wir verteilten eine kleine Menge Saatgut traditionell salzresistenter Landrassen wie Lal Getu, Nona bokra und Talmugur aus den Beständen der Vrihi-Saatgutbank an einige Bauern in Inselndörfern der Sundarbans. Dies waren die einzigen Reissorten, die in jener katastrophalen Saison auf den versalzten Böden einen messbaren Ertrag lieferten. Auch 1999 sicherten mehrere alte Sorten wie Jabra, Rani kajal und Lakshmi dighal die Reisproduktion von Bauern im Süden Westbengalens nach einer sturzflutartigen Überschwemmung durch den Fluss Hugli. Und im Jahr 2010 retteten die Sorten Bhutmuri, Kalo gorah, Kelas und Rangli viele traditionelle Bauern im westlichen Distrikt Puruliya, als durch die Verspätung der Monsunregenfälle eine schwere Dürre ausbrach.

Solche Katastrophen beweisen immer wieder, dass die langfristige Nachhaltigkeit des Reisanbaus entscheidend von der Rückbesinnung auf und der Wiederherstellung traditioneller Anbaupraktiken abhängt, die sich auf Biodiversität und die Nutzung der gesamten Getreidesorten-Vielfalt stützen. ◀

QUELLEN

Deb, D. et al.: A profile of heavy metals in rice (*Oryza sativa* ssp. *indica*) landraces. *Current Science* 109, 2015

Deb, D.: Seeds of tradition, seeds of future: Folk rice varieties of Eastern India. *Research Foundation for Science Technology & Ecology*, New Delhi, 2005

Gupta, S. S. et al.: Unusual accumulation of silver in the aleurone layer of an Indian rice (*Oryza sativa*) landrace and sustainable extraction of the metal. *ACS Sustainable Chemical Engineering* 5, 2017

LEBENSMITTEL PFLANZENPROTEINE FÜR FLEISCHFREUNDE

In den Supermarktregalen häufen sich immer mehr Fleischersatzprodukte. Aber können sie das Original wirklich überzeugend nachahmen? Erstaunlicherweise weiß man bisher wenig über die Verarbeitung von pflanzlichen Proteinen – was Forscher nun ändern wollen.

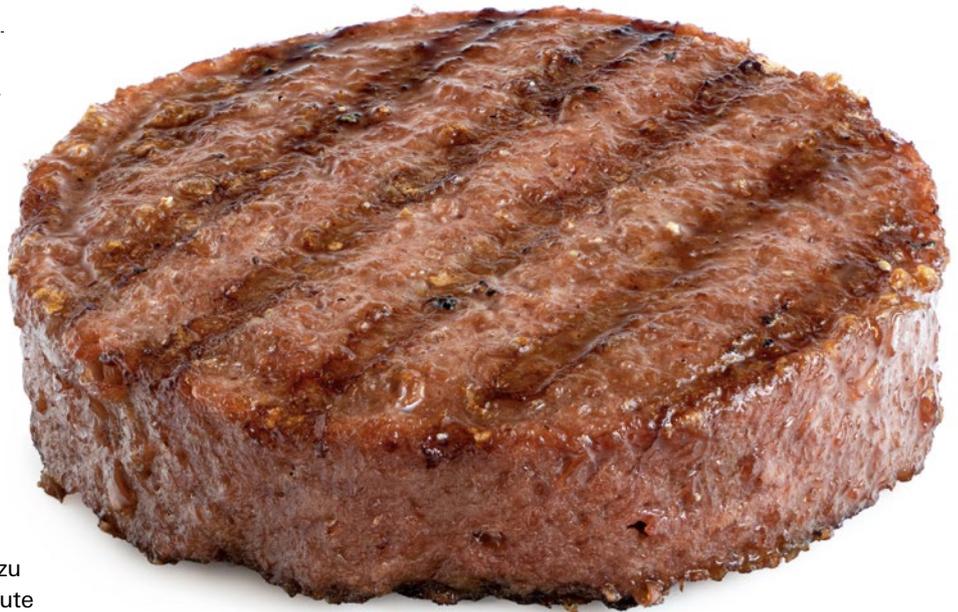


M. Azad Emin ist Verfahrenstechniker am Karlsruher Institut für Technologie.

► [spektrum.de/artikel/1736688](https://www.spektrum.de/artikel/1736688)

► Fleisch spielt in unserer Gesellschaft eine große Rolle, sei es bei der Martinsgans, dem Weihnachtessen oder einer Grillparty. Viele Forscher gehen davon aus, dass der Fleischkonsum uns überhaupt erst zu den Menschen gemacht hat, die wir heute sind. Unter anderem lieferten uns tierische Proteine kalorienreiche Mahlzeiten, die mit weitaus weniger Aufwand verbunden waren als etwa der Verzehr von Wurzeln. Einigen Studien zufolge prägte der Fleischkonsum auch das menschliche Sozialverhalten: Unsere sprachlichen, organisatorischen und gesellschaftlichen Fähigkeiten entwickelten sich durch die Jagd weiter, da wir dabei gezwungen waren, zu kooperieren.

Allerdings stellt der hohe Fleischkonsum heutzutage ein Problem dar. Die damit verbundene Landwirtschaft ist für die Umwelt extrem belastend (siehe »Weniger Fleisch für die Umwelt«, S. 51), zudem vermuten Forscher, dass übermäßiger Verzehr mit gesundheitlichen Risiken einhergeht. Darüber hinaus gibt es auch ethische Gründe, die in den letzten Jahren immer mehr Menschen dazu veranlassen haben, auf Fleisch zu verzichten. 2019 stufen sich in Deutschland etwa sechs Millionen Personen als Vegeta-



ETIENNE VOISS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Optisch kommen Fleischersatzprodukte an das Original heran. Die richtige Konsistenz stellt aber ein Problem dar.

rier ein. Für die übrigen 74 Millionen, zu denen ich auch zähle, sind Grillpartys bloß mit Gemüse aber nur schwer vorstellbar.

Die Lebensmittelindustrie hat auf diesen Trend reagiert und zahlreiche fleischlose Alternativen auf den Markt gebracht: von Veggie-Grillwürstchen über Steaks auf Erbsenbasis hin zu Seitan-Burgerpatties. Mit dem Original können die meisten Produkte allerdings nicht mithalten – vor allem was die Textur angeht, sind viele der Imitate nicht wirklich überzeugend. Das liegt unter anderem daran, dass

man bisher nur sehr wenig über das Verhalten von Pflanzenproteinen weiß.

Seit dem Ende meiner Promotion im Jahr 2013 untersuche ich daher zusammen mit meiner Arbeitsgruppe am Karlsruher Institut für Technologie, wie sich pflanzliches Eiweiß zu fleischähnlichen Produkten verarbeiten lässt. Wir verfolgen dabei das ehrgeizige Ziel, den gesamten Ablauf der Lebensmittelherstellung vom Rohmaterial bis zum Endprodukt im Detail zu untersuchen, um herauszufinden, welche Bedingungen für ein bestimmtes Resultat entscheidend sind. Das ist äußerst schwierig, weil dabei etliche verschiedene komplizierte Prozesse gleichzeitig ablaufen. Wir fanden heraus, dass Proteine unterschiedlicher pflanzlicher Quellen wie Soja oder Weizen vollkommen anders auf die Verarbeitung reagieren. Unsere Ergebnisse könnten dabei helfen, zielgerichtete Verfahren zu entwickeln, um überzeugendere Fleischersatzprodukte herzustellen.

Auf das richtige Mundgefühl kommt es an

Schon seit mehr als 2000 Jahren gibt es Lebensmittel wie Tofu aus Sojabohnen oder Seitan auf Weizenbasis, die sich als Alternative zu Fleisch eignen. Auch wenn viele Menschen sie als schmackhaft empfinden, fehlt ihnen aber das typische Mundgefühl, nämlich die muskelähnliche Textur, die echtes Fleisch ausmacht. Es ist daher nicht wirklich überraschend, dass ihr Erfolg als Fleischersatzprodukt bisher nur mäßig ausfiel.

Wenn man heute durch die Supermarktregale schlendert, entdeckt man allerdings eine ganze Palette neuartiger Lebensmittel, die Fleisch in Aussehen, Geruch, Geschmack, Mundgefühl und Nährwert versuchen nachzuahmen – mit dem großen Vorteil, dass sie auf nachhaltigen Ressourcen wie Pflanzen, Mikroalgen oder gar Insekten basieren (siehe »Fleischalternativen«, S. 48/49). Im Gegensatz zu Seitan oder Tofu besitzen sie eine faserige Textur, die der von Fleisch ähnelt. Auch wenn die meisten Produkte das tierische Original nicht genau imitieren, erfreuen sie sich immer größerer Verkäufe. Der Absatz von Fleischalternativen hat sich in Deutschland in den letzten fünf Jahren mehr als verdoppelt, und Experten erwarten, dass er weiter steigen wird. Überraschenderweise sind die meisten Verbraucher dabei keine Vegetarier oder Veganer, sondern Fleischesser.

Trotz des positiven Trends ergaben viele Umfragen, dass die pflanzlichen Produkte die Erwartungen häufig nicht erfüllen. Deshalb gab es in den letzten Jahren zahlreiche Investitionen und etliche neu gegründete Start-up-Unternehmen in diesem Bereich. Obwohl das Geschäft schnell wächst, ist es immer noch eine Herausforderung, überzeugende Fleischalternativen herzustellen.

Zurzeit nutzt man für fast alle Fleischersatzprodukte die so genannte Extrusionstechnologie, mit der man seit den 1930er Jahren Teigwaren wie Nudeln, Frühstückszerealien und andere Snacks herstellt. Ein Extruder ähnelt dabei einem riesigen Fleischwolf, der allerdings über zwei Schnecken statt nur einer verfügt. Die Geräte können mehrere Arbeitsschritte gleichzeitig durchführen, etwa Mischen, Kneten, Kochen, Formen und Texturieren. Je nach Anforderung

AUF EINEN BLICK PFLANZLICHE STEAKS FÜR DAS TIERWOHL

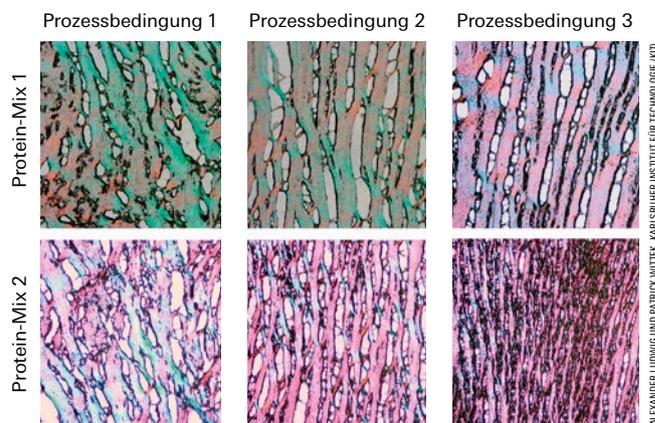
- 1 Viele Menschen wollen ihren Fleischkonsum aus ethischen, ökologischen oder gesundheitlichen Gründen reduzieren.
- 2 Die Lebensmittelindustrie bietet daher vermehrt Ersatzprodukte auf pflanzlicher Basis an. Bisherige Alternativen können tierische Originale allerdings noch nicht überzeugend imitieren.
- 3 Deshalb untersuchen Forscher, wie man aus Pflanzenproteinen jene faserige und saftige Struktur erzeugen kann, die echtes Fleisch ausmacht.

lassen sich pro Stunde bis zu mehrere Tonnen eines Produkts verarbeiten.

Lebensmittelverfahrenstechniker fanden heraus, dass es oft vorteilhaft ist, den Ausgangsteig bei Temperaturen über 100 Grad Celsius zu verarbeiten. Denn das beschleunigt nicht nur den Kochvorgang auf weniger als eine Minute, sondern führt auch dazu, dass das darin befindliche Wasser verdampft. Das verleiht verzehrfertigen Lebensmitteln wie Frühstückszerealien oder Erdnussflips ihre einzigartige, knusprige Textur.

Mit dieser Methode stellten sie auch Presskuchen aus Soja her, der unter anderem als Futtermittel für Tiere dient. Den Ingenieuren fiel dabei auf, dass der Kuchen durch die Verarbeitung eine faserige, fleischähnliche Struktur erhält. Das brachte sie auf die Idee, Fleisch mit Hilfe von Extrudern durch pflanzliche Produkte nachzuahmen. Damals waren es keine ökologischen oder gesundheitlichen Gründe, die Menschen dazu brachten, auf Fleisch zu verzichten, son-

Die Struktur eines Produkts hängt von den Prozessbedingungen und der Proteinquelle ab. Das Beispiel unten rechts ähnelt Fleisch mit seinen sehr feinen faserigen Strukturen.



den überwiegend ökonomische Faktoren: Wegen des hohen Preises konnten es sich viele nicht leisten, das tierische Gut häufig zu konsumieren.

Bereits 1960 führte die US-amerikanische Firma Worthington Foods of Ohio die erste derart texturierte Hähnchenalternative »FriChik« ein. Produkte, die man durch eine solche Trockenextrusion bei über 100 Grad Celsius und mit niedrigem Wassergehalt gewinnt, werden als texturiertes Pflanzenprotein (englisch: textured vegetable protein, TVP) bezeichnet. Vor dem Verzehr muss man sie meist mit warmem Wasser rehydrieren, so wie Sojagranulat, das als Hackfleischersatz dient.

Mit Hilfe von Halloumi zum pflanzlichen Steak

Inzwischen gibt es neben solchen Produkten auch »nasse« Varianten. In diesem Fall mischt man den Pflanzenproteinen schon bei der Herstellung im Extruder mehr Wasser bei; ähnlich wie Fleisch enthalten sie dann 60 bis 70 Prozent. Im Gegensatz zur Trockenextrusion verwendet man für die Texturierung des Teigs eine lange Düse, die gleichzeitig auch gekühlt wird, damit nichts verdampft. Die pflanzlichen Filetstücke, die man heute in fast jedem Supermarkt findet, werden durch diese Nassextrusion hergestellt.

Obwohl Lebensmittelverfahrenstechniker schon seit Jahrzehnten pflanzliche Proteine mit der Extrusionstechnologie verarbeiten, gibt es kaum wissenschaftliche Erkenntnisse in dem Bereich. Meist stützen sie sich auf wenige Erfahrungen. Die Produzenten müssen nach dem Trial-and-Error-Prinzip viele verschiedene Versuche starten, bis sie die passenden technischen Einstellungen (etwa Temperatur und Drehzahl der Schnecken) gefunden haben, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Zudem lassen sich die gewonnenen Informationen nicht ohne Weiteres auf andere Systeme übertragen, wenn man zum Beispiel Erbsen- statt Sojaproteine nutzen möchte. Wegen der jahrelangen Erfahrung mit Produkten auf Soja- und Weizenbasis dominieren diese daher den Markt, obwohl viele Verbraucher andere Proteinquellen bevorzugen würden.

Um mehr über das Verhalten von Pflanzenproteinen zu erfahren, kann man die Käseherstellung genauer studieren. Diese folgt häufig traditionellen Rezepten, doch sie ähnelt dabei dem industriellen Extrusionsprozess. So genannte Filata-Käse, zu denen Mozzarella, Halloumi oder Çeçil gehören, besitzen nämlich eine Struktur, die man auch in Fleischersatzprodukten erzeugen möchte: Anders als Quark oder Hartkäse sind sie anisotrop, das heißt, ihre Textur ist

Fleischalternativen

Bei den vielen Fleischersatzprodukten in den Supermarktregalen verliert man schnell den Überblick. Hier sind einige der beliebtesten Alternativen vorgestellt.

1 Tofu ist eine Art Quark aus Sojabohnen. Dazu stellt man aus den Bohnen zuerst eine Milch her, die man anschließend – wie bei der Käseproduktion – zum Gerinnen bringt. Dadurch entsteht eine gleichmäßige Masse, die relativ geschmacksneutral ist. Es gibt Hinweise darauf, dass Tofu bereits vor 2000 Jahren in Asien hergestellt wurde. Neben Reis zählt er in einigen südostasiatischen Ländern zu den Grundnahrungsmitteln.

2 Um Sojagranulat zu produzieren, braucht man Sojaproteinkonzentrat, das man anschließend in einem Extruder zu einer fleischähnlichen Form verarbeitet. Dadurch entsteht ein geschmacksneutrales, poröses Granulat, das man in Wasser einweichen muss. Das Ergebnis hat dann eine ähnliche Konsistenz wie Hackfleisch.

3 Tempeh entstand vor etwa 1000 Jahren auf Indonesien. Dabei handelt es sich um Sojabohnen, die man durch die Beigabe bestimmter Schimmelpilze fermentiert. Die Konsistenz von Tempeh ist etwas fester als die von Tofu, zudem hat es einen nussigen Eigengeschmack.

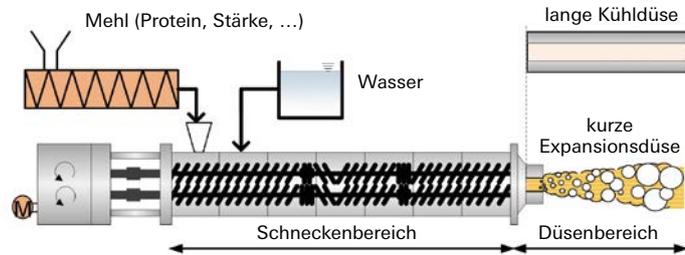
4 Seitan ist ein Lebensmittel auf Weizenbasis, das schon im 6. Jahrhundert in China hergestellt wurde und heute in der japanischen Küche besonders verbreitet ist. Indem man Weizenmehl wiederholt mit Wasser auswäscht, entzieht man ihm die Stärke, bis eine glutenhaltige Masse übrig bleibt. Nach dem Kochen entwickelt sie eine fleischartige Konsistenz, besitzt aber wenig eigenen Geschmack.

5 Auf Mykoprotein basierende Lebensmittel enthalten fermentierte Zellen eines Schlauchpilzes. Indem man sie mit weiteren Zutaten vermischt – oftmals mit Eiweiß aus Hühnereiern –, lassen sie sich zu einem fleischähnlichen Produkt verarbeiten. Das Ergebnis kann unter anderem Hackfleisch, Würstchen oder Hähnchenbrust imitieren.

6 Es gibt zahlreiche Fertigprodukte auf **Erbsen-, Soja- oder Weizenbasis**, die allerlei Fleischvarianten nachahmen: von Würstchen, Hähnchen, Rindfleischpatties, Hackfleisch bis hin zu Gyros oder Pulled Pork. Ein Extruder erzeugt dabei eine fleischähnliche Textur und reichert die Masse mit Wasser an. Einige Firmen setzen den Produkten Häm zu, um den Geschmack von Fleisch besser zu imitieren.

7 Seit 2018 sind in der EU **Insekten** als Lebensmittel zugelassen. Da sie viele Proteine enthalten, lassen sich aus ihnen Ersatzprodukte herstellen. Inzwischen kann man in deutschen Supermärkten Burgerpatties kaufen, die unter anderem aus Proteinen von Würmern bestehen.

Ein Extruder ähnelt einem Fleischwolf mit zwei Schnecken. Damit erzeugen Lebensmitteltechniker je nach Düsentyp knusprige Snacks wie Erdnussflips oder Frühstückszerealien oder Fleischersatzprodukte.



AZAD EMIN, KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

nicht gleichmäßig, sondern variiert je nach Richtung. Zum Beispiel ist Çeçil, der traditionell in Armenien und der Türkei hergestellt wird, extrem faserig und ähnelt dadurch gekochter Hähnchenbrust.

Um Käse herzustellen, müssen die Milchproteine erst gerinnen, damit eine feste Struktur entsteht. Dazu benötigt man entweder Enzyme wie Lab oder Säuren. Sie destabilisieren die wasserunlöslichen Mizellen aus Kasein, wodurch die Milchproteine stärker miteinander wechselwirken können. Dadurch verwandelt sich die Milch in eine Art Gel, mit einem festen Netzwerk aus Proteinen und der flüssigen, darin eingeschlossenen Süßmolke.

Anschließend wird das Produkt in kleinere Teile geschnitten, um die Molke abzutrennen. Es bildet sich der

teigige Käsebruch. Je nach Temperatur und Größe der Bruchstücke erzeugt man einen weicheren oder härteren Käse. Bei Filata-Sorten übergießt man das Proteinnetzwerk mit heißem Wasser, in dem man es anschließend presst, knetet und zu langen Strängen zieht. Dadurch entsteht die charakteristische faserige Struktur dieser Käsesorten.

Um Fleischimitate aus Pflanzenproteinen herzustellen, geht man gleich vor. Zuerst erzeugt man ein Proteinnetzwerk, das geronnener Milch ähnelt, und widmet sich danach der Textur, wie bei der mechanischen Bearbeitung von frischem Käsebruch.

Im Schneckenbereich des Extruders spielt sich der erste Teil ab. Dort werden die pflanzlichen Protein-Wasser-Mischungen bei einer bestimmten Temperatur vermengt und geknetet. Das führt dazu, dass die Proteine sich in einem Netzwerk anordnen. Wie genau sie das tun, lässt sich durch äußere Bedingungen wie Temperatur und mechanische Kräfte steuern. Davon abhängig entsteht ein Teig mit verschiedenen Eigenschaften, ähnlich wie beim Käse: weich wie Mozzarella oder aber gummiartig wie Halloumi. Auch andere Merkmale wie Wasserlöslichkeit oder Adsorptionskapazität hängen davon ab, wie die Eiweißmoleküle miteinander wechselwirken.

Die Verarbeitung von Pflanzenproteinen unter der Lupe

Allerdings weiß man bisher wenig darüber, wie sich Pflanzenproteine unter typischen Extruder-Bedingungen verhalten. Das liegt sowohl an der komplizierten Struktur der Proteine als auch am unübersichtlichen Extrusionsprozess. Je nach pflanzlicher Basis können sich die molekularen Strukturen der Proteine stark voneinander unterscheiden. Dadurch variiert auch das Endprodukt – und das auf verschiedenen Ebenen. Um nachzuvollziehen, wie ein Proteinnetzwerk entsteht, muss man die molekulare Beschaffenheit der Eiweißmoleküle genauer verstehen. Insgesamt unterteilt man die Proteinstruktur in vier Skalen.

Die Abfolge der Aminosäuren eines Proteins bildet die so genannte Primärstruktur. Sie ähnelt einer Kette, bei der die einzelnen Glieder jeweils einer Aminosäure entsprechen. Jedes Protein besitzt eine eigene charakteristische Sequenz, die seine Form, Größe und Funktion festlegt.

Durch Wasserstoffbrückenbindungen nimmt die Kette regelmäßige Formen an, die man als Sekundärstrukturen bezeichnet. Diese wiederum falten sich räumlich zur Tertiärstruktur, der Gesamtform des Proteins. Das Eiweißmolekül verbiegt und verdreht sich, bis es den niedrigsten Energiezustand erreicht. Die Tertiärstruktur hängt von verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den Aminosäuren ab,

8 Auch **Mikroalgen** haben einen hohen Proteingehalt – bis zu 70 Prozent – und eignen sich daher für Fleischersatzprodukte. Viele halten sie für die Nahrungsmittel der Zukunft, denn sie benötigen keine großen Ackerflächen und entziehen zudem der Luft Treibhausgase.

9 **Lupinen** enthalten bis zu 48 Prozent Eiweiß – und damit noch mehr als Sojabohnen. Inzwischen ist es Forschern am Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung in Freising gelungen, Lupinenmehl die Bitterstoffe zu entziehen, wodurch es sich nun auch zu Fleischersatzprodukten verarbeiten lässt.

10 In den letzten Jahren exportierten asiatische Länder immer größere Mengen **Jackfrüchte**, die in Europa und Nordamerika als Fleischersatz genutzt werden. Durch ihre faserige Struktur ähneln sie geschmorten Fleischgerichten.

11 Wissenschaftler erzeugen inzwischen sogar **Laborfleisch**, indem sie Tieren über eine Biopsie Zellen entnehmen und daraus Fleisch züchten. Das ist bisher allerdings noch sehr aufwändig: Der erste gezüchtete Burger kostete 2013 in der Produktion mehr als 250 000 Euro. 2019 sanken die Kosten auf etwa 90 Euro. Experten erwarten, dass Laborfleisch in den nächsten Jahren immer erschwinglicher wird, wodurch sich der kommerzielle Vertrieb bald lohnen könnte.

etwa von Van-der-Waals-Kräften, Wasserstoffbrückenbindungen oder Disulfidbrücken. Mehrere Proteine können sich darüber hinaus zu einer Quartärstruktur zusammenschließen, einem Proteinkomplex.

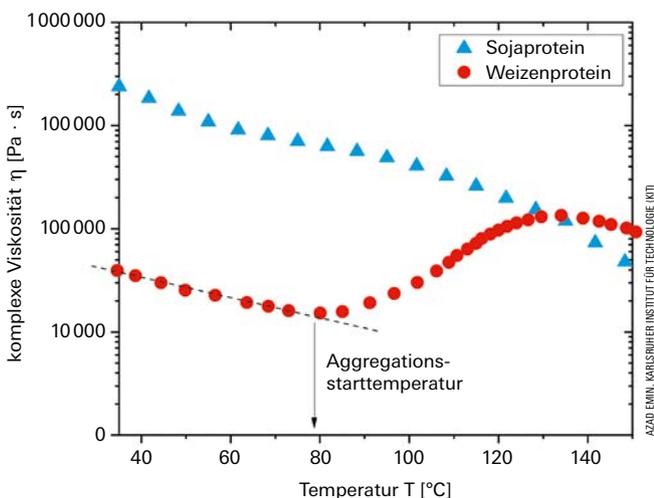
Weil die räumliche Struktur der Proteine durch vergleichsweise schwache Kräfte entsteht, erweisen sie sich als sehr empfindlich. Variierende Temperaturen und pH-Werte, Wasserentzug sowie Kontakte mit hydrophoben Oberflächen oder Metallionen können dazu führen, dass die Eiweißmoleküle ihre native Gestalt verlieren. Dann nennt man sie denaturiert. Das passiert zum Beispiel, wenn man einen Burger grillt oder ein Ei brät.

Im Extruder denaturieren die pflanzlichen Proteine durch die thermische und mechanische Behandlung. Möchte man vorhersagen, wie viskos, elastisch und wasserlöslich eine pflanzliche Proteinmasse unter bestimmten Bedingungen wie Temperatur, Wassergehalt und Schneckendrehzahl in einem Extruder ausfallen wird, muss man die Prozesse auf molekularer Ebene nachvollziehen. Doch das ist so gut wie unmöglich: Allein die tertiäre Struktur eines Proteins aus einer gegebenen Aminosäuresequenz zu berechnen, stellt Wissenschaftler vor große Herausforderungen (siehe Artikel ab S. 23).

Um die Eigenschaften eines Produkts genauer zu kontrollieren, versuche ich mit meinen Kollegen herauszufinden, wie Pflanzenproteine auf verschiedene Verarbeitungsschritte reagieren. Zudem wollen wir die Unterschiede im Verhalten von Eiweißen diverser Pflanzenarten untersuchen – denn bisher weiß man kaum etwas darüber.

Das liegt daran, dass sich der Extrusionsprozess nicht systematisch untersuchen lässt. Ein Extruder ist ein geschlossenes System, in dem die Proteine sowohl thermischen als auch mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Die dabei erzeugten Kräfte hängen von der genauen Form der Schnecken ab und variieren entlang

Proteine auf Weizen- und Sojabasis reagieren sehr unterschiedlich auf äußere Bedingungen. Während die Viskosität der Sojamasse mit steigender Temperatur abnimmt, wird der Weizenteig ab 80 Grad Celsius durch die Hitze viskoser.



diesen auch stark. Die Wechselwirkungen zwischen den Proteinen lassen sich in den komplexen Geräten kaum analysieren.

Deshalb erzeugen wir in unseren Labor Bedingungen, die denen eines Extruders ähneln, aber wesentlich besser kontrollierbar sind. Damit können wir die Prozesse, die sich bei der Herstellung von Fleischersatzprodukten abspielen, wissenschaftlich studieren.

Unter anderem haben wir bestimmt, wie reaktiv die Eiweißmoleküle unterschiedlicher pflanzlicher Quellen sind. Dazu analysierten wir das Fließverhalten von Proteinmassen bei verschiedenen Temperaturen. Typischerweise wird ein Teig weniger viskos, wenn man ihn erhitzt, weil sich die Moleküle dann stärker bewegen. Wenn die Temperatur allerdings so hoch ist, dass sich die chemische Struktur ändert, zum Beispiel indem die Proteine auf Grund von Denaturierung zusammenklumpen, kann die Viskosität plötzlich wieder zunehmen.

Soja- und Weizenproteine im direkten Vergleich

In unseren Experimenten haben wir Soja- und Weizenproteine miteinander verglichen – und dabei deutliche Unterschiede festgestellt. Bei niedrigen Temperaturen von weniger als 100 Grad Celsius ist die Sojamasse wesentlich dickflüssiger als die auf Weizenbasis. Um zu prüfen, ob die Sojaproteine bereits denaturiert sind, erwärmten wir die Masse. Dabei nahm die Viskosität kontinuierlich ab, was zeigt, dass dies nicht der Fall war. Die Weizenproteine beginnen dagegen bei etwa 80 Grad Celsius zu einem Netzwerk zu aggregieren. Interessanterweise lassen sich beide Teige erst bei hohen Temperaturen von etwa 130 bis 140 Grad Celsius texturieren. Unter diesen Bedingungen weisen Weizen- und Sojaproteine ein ähnliches Fließverhalten auf.

Obwohl sich beide Ausgangsmassen stark unterscheiden, verhalten sich die Proteine unter bestimmten Bedingungen fast gleich, auch wenn verschiedene Mechanismen am Werk sind. Die Sojaproteine müssen durch höhere Temperaturen weniger viskos werden, während Weizenproteine die Hitze brauchen, um zu denaturieren und aggregieren und dadurch ähnliche Materialeigenschaften wie die Sojamasse zu entwickeln.

Neben den Analysen der Materialeigenschaften im Labor untersuchten wir auch durch computergestützte Verfahren, wie sich die Proteine im Extruder verhalten. Dazu entwarfen wir Simulationen, mit denen wir die Strömungen und das thermomechanische Beanspruchungsprofil im Extruder bestimmt haben. Mit den gewonnenen Informationen können wir angeben, welche Prozessbedingungen am besten zum jeweiligen Pflanzenprotein passen.

Ein gutes Steak zeichnet sich aber nicht bloß durch seine faserige Textur aus, sondern auch dadurch, dass es saftig ist. Fleischersatzprodukten fehlt es oftmals an Fett, was sie trocken macht. Fügt man jedoch den Proteinmassen im Extruder mehr Fett hinzu, lässt sich die faserige Struktur nicht mehr erzeugen. Deshalb versuchen wir momentan zu verstehen, wie das Fett das Verhalten der Proteine und damit den Verarbeitungsprozess beeinflusst. Wir hoffen so Strategien zur besseren Fettverteilung in den Proteinen zu

Weniger Fleisch für die Umwelt

Fleisch macht immer noch einen großen Teil unserer Ernährung aus. Weltweit produzieren wir heute mehr als viermal so viel Fleisch wie vor 50 Jahren, was große Probleme schafft. Denn nicht nur der individuelle Konsum, sondern auch die Weltbevölkerung wächst rapide an. Laut Schätzungen der UNO wird es 2050 fast zehn Milliarden Menschen geben – das würde bedeuten, dass Landwirte bis dahin rund 50 Prozent mehr Nahrungsmittel erzeugen müssten.

Die landwirtschaftliche Tierhaltung ist weltweit bereits für 14,5 Prozent der Treibhausgasemissionen, 40 Prozent der Land- und knapp 70 Prozent der Süßwassernutzung verantwortlich. Würde man statt Rindfleisch die gleiche Menge an Proteinen aus Hülsenfrüchten verzehren, bräuhete man etwa zehnmal weniger Land, fünf-

mal weniger Frischwasser und würde nur ein Zehntel der Treibhausgasemissionen erzeugen. Zudem deuten einige Studien darauf hin, dass eine fleischreiche Ernährung das Risiko für Fettleibigkeit, Krebs und Herzkrankheiten erhöht.

In den letzten Jahren versuchten immer mehr Menschen aus westlichen Ländern ihren Fleischkonsum zu reduzieren. Eine Anfang 2020 erschienene Studie ergab, dass heute weltweit deutlich mehr Gemüse verzehrt wird als früher. Außerdem isst man in den USA, Kanada und Australien, aber auch in Deutschland und Frankreich um bis zu 20 Prozent weniger Fleisch als vor einigen Jahrzehnten.

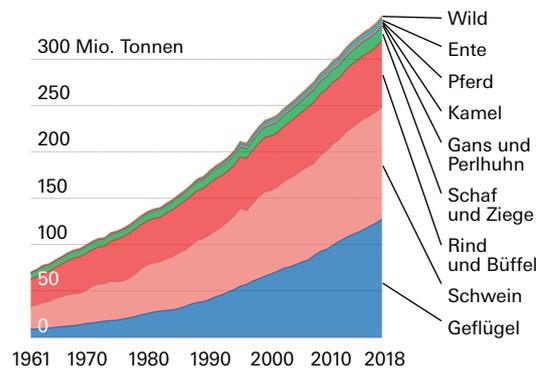
Und auch Regierungen versuchen, die Essgewohnheiten ihrer Bürger zu verändern. Erst kürzlich verbannte der Leiter der Goldsmiths University of London im Kampf

gegen den Klimawandel zum Beispiel jegliches Rindfleisch vom Campus, während der Stadtrat von Helsinki beschlossen hat, den Fleisch- und Milchkonsum in den nächsten sechs Jahren um 50 Prozent zu senken. Ein Café der Universität Helsinki hat Rindfleisch von der Speisekarte gestrichen – zugleich bieten die Kommunen in ganz Finnland mehr lokale, vegetarische und vegane Angebote für das Mittagessen an Schulen. In Schweden hat nun erstmals eine vegane Schule geöffnet, die Schülern ausschließlich pflanzliche Lebensmittel anbietet und sie über Nachhaltigkeit, Gesundheit und Ethik unterrichtet. Doch während in den westlichen Ländern der Fleischkonsum sinkt, steigt er Studien zufolge im südostasiatischen Raum mit dem wachsenden Wohlstand der Menschen an.

Treibhausgasemissionen pro 100 Gramm Protein



Weltweite Fleischproduktion nach Art



entwickeln, die zu überzeugenden fleischähnlichen Alternativen führen.

Angesichts der zunehmenden Forschungsaktivitäten sowie der wachsenden Zahl von Unternehmen in diesem Bereich bin ich überzeugt, dass in den kommenden fünf Jahren deutlich bessere Produkte entstehen werden – auch wenn es wahrscheinlich noch länger dauert, bis eine pflanzliche Fleischalternative ein echtes Steak überzeugend imitiert.

Durch unsere Forschung verstehen wir die moderne Verarbeitungstechnologie immer besser und können dadurch Produkte schaffen, die Fleisch in vielen Aspekten überlegen sind. Solche Fleischersatzprodukte stellen dabei nicht bloß eine nachhaltige Proteinquelle dar, sondern

könnten künftig auch ein besseres Lipidprofil als Fleisch bieten, mit mehr Ballast- und Bioaktivstoffen, die nachweislich gesundheitsfördernd sind. ◀

QUELLEN

- Emin, M.A. et al.:** Analysis of the reaction behavior of highly concentrated plant proteins in extrusion-like conditions. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 44, 2017
- Emin, M.A.:** Modeling extrusion processes. In: Bakalis, S. et al. (Hg.): *Modeling Food Processing Operations*. Woodhead, 2015, S. 235–253
- Pietsch, V.L. et al.:** High moisture extrusion of wheat gluten: Relationship between process parameters, protein polymerization, and final product characteristics. *Journal of Food Engineering* 259, 2019

SERIE

Die Röntgen-Revolution

Teil 1: Mai 2020
Als die Welt durchsichtig wurde
Dirk Eidemüller

Teil 2: Juni 2020
Blick in den Körper
Stefan Wesarg, Emmanuelle Vaniet

Teil 3: Juli 2020
Röntgenteleskope
Jan Hattenbach, Belinda J. Wilkes

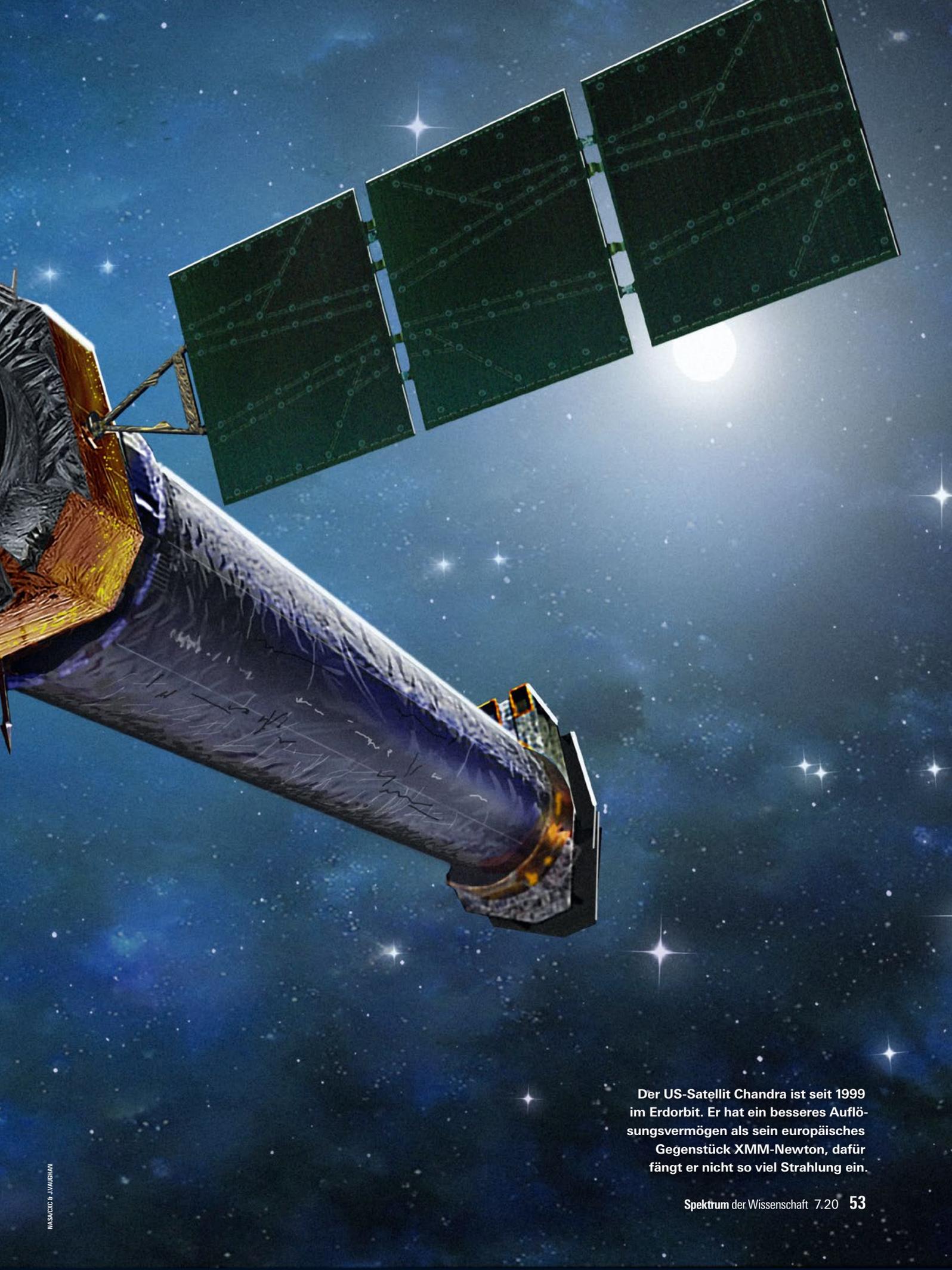
RÖNTGENTELESKOPE DAS ALL IN NEUEM LICHT

Zur Untersuchung des Universums und seiner exotischsten Orte ist Röntgenstrahlung heute unverzichtbar. Ihr Siegeszug in der Astronomie begann mit einer Zufallsentdeckung vor rund 60 Jahren.



Jan Hattenbach ist Wissenschaftsjournalist auf La Palma.

» spektrum.de/artikel/1736690



Der US-Satellit Chandra ist seit 1999 im Erdorbit. Er hat ein besseres Auflösungsvermögen als sein europäisches Gegenstück XMM-Newton, dafür fängt er nicht so viel Strahlung ein.

Die meisten Sterne am Himmel leuchten für das menschliche Auge weiß. Nur bei einigen wenigen lässt sich eine Färbung wahrnehmen, etwa bei den beiden hellsten im Sternbild Orion: Der rote Beteigeuze ist mit etwa 3500 Grad Celsius an der Oberfläche verhältnismäßig kühl, während der blaue Rigel über 11000 Grad hat. Noch heißere Sterne senden den Löwenanteil ihres Lichts als für uns unsichtbare Ultraviolettstrahlung aus.

Es geht aber noch energiereicher. Astrophysiker beobachten seit fast 60 Jahren Röntgenstrahlung aus dem All. Allerdings müssten solche »Röntgensterne« in ihren Photosphären, das sind sozusagen ihre sichtbaren Oberflächen, viele hunderttausend Grad aufweisen – die kosmische Röntgenstrahlung entsteht also anders als das sichtbare Sternenlicht. Heute sind die tatsächlichen Ursachen bekannt: Magnetfelder, Explosionen von Riesensternen oder die Umgebung von Schwarzen Löchern, die Materie verschlingen. Doch bis zu diesen Erkenntnissen war es ein weiter Weg.

Die kosmische Röntgenstrahlung erreicht die Erdoberfläche nicht, denn die Lufthülle absorbiert sie. Nach Wilhelm Conrad Röntgens Entdeckung verging daher fast ein halbes Jahrhundert, bis Menschen das Röntgenlicht aus dem All bemerkten.

Den Anfang machten Wissenschaftler des US-amerikanischen Naval Research Laboratory (NRL). Seit den 1920er Jahren erforschten sie mit Hilfe einfacher Raketen die Ionosphäre der Erde (ein Bereich der hohen Atmosphäre, der mehrere Schichten mit geladenen Teilchen enthält), vor allem, um die Radiokommunikation für das Militär zu verbessern. Dabei untersuchten sie auch UV- und Röntgenlicht in der Hochatmosphäre: 1949 zeigte eine NRL-Gruppe um den Physiker Herbert Friedman, dass die Sonne eine schwache Röntgenquelle ist. Den Durchbruch erreichten die Forscher mit Hilfe der im Weltkrieg erbeuteten deutschen V2, der damals leistungsfähigsten Rakete der Welt. Mit dieser Technologie brachten sie Instrumente wie Geigerzähler über die Erdatmosphäre.

Die Röntgenstrahlung der Sonne entsteht in den starken Magnetfeldern der solaren Atmosphäre. Im Vergleich zum



Die Illustration zeigt das 1999 gestartete europäische Röntgenteleskop XMM-Newton.

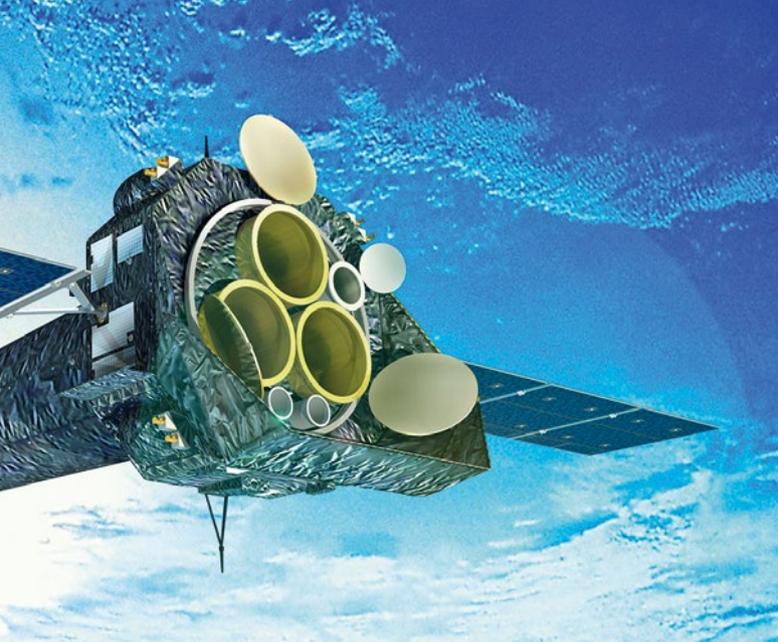
sichtbaren Licht leuchtet unser Heimatstern im Röntgenbereich millionenfach schwächer. Die Wissenschaftler fragten sich deswegen, ob überhaupt eine Chance bestand, von anderen Sternen Röntgenstrahlung zu empfangen. Damit dies gelänge, so wusste man bereits damals, müssten die Sensoren mindestens 1000-mal empfindlicher sein als die seinerzeit vorhandenen.

Darum war die 1958 gegründete NASA in Sachen Röntgenastronomie zunächst zurückhaltend. Wie aber konnte man sicher sein, dass in diesem Wellenlängenbereich am Himmel außer der Sonne wirklich nichts zu sehen ist? Das wollte zum Beispiel Riccardo Giacconi wissen. Der Astrophysiker arbeitete seit 1959 bei American Science & Engineering, einer privaten Firma, die unter anderem für das US-Militär forschte. Giacconi verkaufte seinen Auftraggebern folgende Idee: Der von der Sonne ausgehende Wind aus geladenen Teilchen könnte auch den Mond durch Röntgenfluoreszenz leuchten lassen. Der Prozess würde nicht nur Informationen über den Einfluss der Strahlung in Erdnähe liefern, sondern über die Mondoberfläche selbst – auf der bald womöglich US-Amerikaner wandeln sollten. Giacconi hatte den richtigen Ton gefunden. Die Air Force genehmigte einen Flug mit einer Aerobee, einer neu entwickelten, leichteren und erheblich kostengünstigeren Rakete als der V2.

Die beiden ersten Versuche, so einen Röntgendetektor von der Größe einer Pillendose ein paar Minuten lang über die Atmosphäre zu heben, misslangen. Erst versagte der Raketentriebwerk, dann öffnete sich das Fenster vor dem Gerät nicht. Doch im dritten Anlauf am 12. Juni 1962 brachte eine Aerobee Giacconis Detektor fünf Minuten und 50 Sekunden lang in 80 Kilometer Höhe. Tatsächlich prasselten einige Röntgenphotonen pro Sekunde auf die Elektronik. Überraschenderweise kam sie aus allen möglichen Richtungen, egal wohin die Rakete sich wendete. Als sich das Detektorfenster in Richtung des Sternbilds Skorpion drehte, stieg die Zählrate allerdings sprunghaft an. Giacconi und sein Team hatten die erste Röntgenquelle außerhalb des Sonnensystems identifiziert!

AUF EINEN BLICK VERBORGENE SPEKTAKEL

- 1 Die kosmische Röntgenstrahlung durchdringt die Erdatmosphäre nicht. Ihre Erforschung begann erst mit dem Raumfahrtzeitalter.
- 2 Anfangs waren die Entdeckungen völlig überraschend. Überall im Universum tauchten mehr und mehr Quellen auf. Mögliche Erklärungen waren lange umstritten.
- 3 Klarheit brachten Aufnahmen mit modernen Satelliten. Diese fokussieren die Strahlung mit ausgefeilten Spiegelsystemen. Neue Missionen sollen noch bessere Einblicke ermöglichen.



ESA - D. DICICRIS (WWW.ESA.INT/ESA_MULTIMEDIA/IMAGES/2008/ARTIST_S_IMPRESSION_OF_XMM-NEWTON)

Sie nannten sie Scorpius X-1 (nach dem Sternbild Skorpion und dem englischen Begriff x-ray). Die Entdeckung war der Startschuss für die Röntgenastronomie und sollte Giacconi 2002 den Nobelpreis für Physik einbringen.

Dabei lag Scorpius X-1 während des kurzen Flugs nur durch einen glücklichen Zufall im Visier des Detektors. Hätte die Rakete beim ersten Versuch wenige Monate zuvor funktioniert, wäre ihr der Fang ohnehin durch die Lappen gegangen, denn die seinerzeit eingebauten Instrumente waren noch nicht empfindlich genug dafür. Es hätte womöglich Jahre gedauert, bis das Militär eine weitere Unternehmung finanziert hätte. Sehr wahrscheinlich wäre Friedmans Gruppe dann Giacconi zuvorgekommen: Im April 1963 gelang den NRL-Physikern die Bestätigung von Scorpius X-1 und die Entdeckung einer weiteren Röntgenquelle.

Satelliten brachten eine Flut an Messdaten – und neue Rätsel

Es folgten ein paar Dutzend mehr, verteilt am ganzen Himmel. Die physikalische Ursache war unklar. Sterne konnten es nicht sein, dafür war die Strahlung zu stark. Mit Raketen allein kam man hier nicht weiter – ein Satellit musste her. Ein solcher startete am 12. Dezember 1970. Uhuru (swahili für »Freiheit«) war ein Durchbruch für das junge Forschungsfeld. Dauerte ein typischer Raketenflug im Schnitt 300 Sekunden, beobachtete Uhuru rund 50000 Sekunden lang – und zwar täglich. Nach nur einer Woche hatten die Wissenschaftler mehr Röntgendaten gesammelt als mit allen Raketenflügen der 1960er Jahre zusammen genommen. In seinen zwei Dienstjahren erhöhte der Uhuru-Satellit die Zahl der bekannten kosmischen Röntgenquellen auf über 160 und konnte sie dabei nicht nur stichprobenartig, sondern über Monate hinweg verfolgen. Viele Röntgenobjekte leuchten nämlich keineswegs konstant; ihr Strahlungsfluss schwankt vielmehr in mehr oder weniger regelmäßigen Mustern innerhalb von Sekundenbruchteilen, Minuten oder Tagen.

Doch welche physikalischen Mechanismen steckten dahinter? Röntgenstrahlung kann entstehen, wenn geladene Teilchen etwa in starken Magnetfeldern hohe Energien erreichen. Solche Felder gibt es in Neutronensternen, den exotischen Überresten einstmaliger massereicher Sterne. Ihre

Materie ist auf die Dichte eines Atomkerns komprimiert, und sie drehen sich in Sekundenbruchteilen um ihre Achse. Die entstehende Röntgenstrahlung variiert deswegen periodisch. Solche so genannten Pulsare stellten sich tatsächlich als Röntgenquellen heraus. Doch viele der von Uhuru entdeckten Quellen schwankten nicht im passenden Tempo oder zu unregelmäßig. Es musste noch eine andere Erklärung geben.

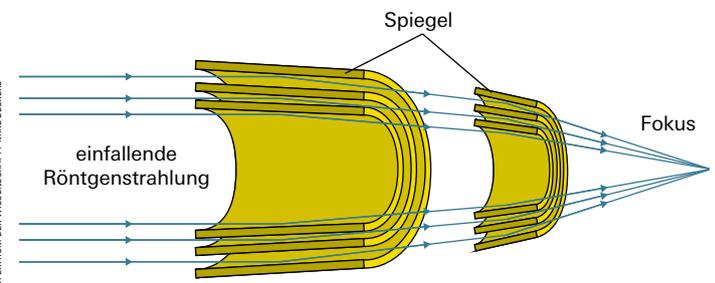
Das Röntgenlicht von Centaurus X-3 zum Beispiel blitzt alle 4,8 Sekunden auf – zu langsam für einen Pulsar. Der polnische Astronom Wojciech Krzemiński kam 1974 auf die richtige Spur. In unmittelbarer Nähe der Röntgenquelle entdeckte er mit einem optischen Teleskop einen Riesenstern von 20 Sonnenmassen. Centaurus X-3 musste also ein Binärsystem sein, in dem sich Riesen- und Neutronensterne gegenseitig umkreisten. Dabei entzieht der Neutronenstern seinem Begleiter Materie. Das Gas sammelt sich in einer so genannten Akkretionsscheibe und wird durch das Magnetfeld des Neutronensterns auf dessen Oberfläche geleitet. Hierbei entsteht die von Uhuru beobachtete, gepulste Röntgenstrahlung.

Dieser Akkretionsprozess findet ebenfalls bei Cygnus X-1 im Sternbild Schwan statt. Anders als bei Centaurus X-3 schwankt die Strahlung jedoch regellos. Auch hier fanden Astronomen einen hellen Stern. Er kreist in knapp einer Woche um die Röntgenquelle, doch diese musste mindestens zehnmal mehr Masse besitzen als die Sonne. Das ist zu viel für einen Neutronenstern. Cygnus X-1 war damit der erste handfeste Kandidat für ein Binärsystem aus einem Stern und einem Schwarzen Loch.

Solche Objekte waren in den 1960er und 1970er Jahren durchaus umstritten. Nicht wenige Zeitgenossen zweifelten an der Existenz von Neutronensternen und hielten Schwarze Löcher allenfalls für eine mathematische Kuriosität. Erst Daten wie die von Uhuru machten Neutronensterne, Schwarze Löcher und Pulsare zum Standardinventar der Astronomie.

Die Uhuru-Mission endete 1973. Weitere Satelliten brachten die Zahl der bekannten Röntgenquellen bis Anfang der 1980er Jahre auf fast 700, doch allen fehlte ein Teleskop für detaillierte Bilder. Ihre Instrumente registrierten

Röntgenstrahlung lässt sich reflektieren und auf einen Detektor fokussieren, sofern der Einfallswinkel sehr flach ist. In einem Wolterteleskop liegen zwei speziell gekrümmte, extrem glatt polierte Flächen hintereinander. Um möglichst viele Photonen einzufangen, werden meist mehrere Paare rohrförmiger Spiegel ineinander verschachtelt.



SPERKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS



ROSCOSMOS/ALFRED JAWORSKI

Der in Deutschland entwickelte Satellit eROSITA ist seit 2019 im All. In sieben Modulen bündeln jeweils 54 verschachtelte Wolterteleskope Röntgenstrahlung auf die Detektoren.

lediglich die Strahlung und die zugehörige Ausrichtung des Satelliten. Auf die Weise sind die Ursprungsorte am Himmel nur grob bestimmbar.

Röntgenstrahlung lässt sich nicht wie sichtbares Licht mit Spiegeln oder Linsen reflektieren und brechen. Dennoch kann man fokussierte Röntgenbilder erzeugen. Für kurzwellige Röntgenstrahlung funktioniert das mit codierten Masken, das sind gewissermaßen Schablonen aus einem stark absorbierenden Material. Aus deren Schattenwurf auf den Detektor lässt sich die Richtung der einfallenden Strahlung berechnen. Ab einer Wellenlänge von etwa 0,1 Nanometer setzte sich dagegen eine 1952 von dem Physiker Hans Wolter in Kiel entwickelte und nach ihm benannte Technik durch. Der Ansatz: Röntgenphotonen können durchaus reflektiert werden, solange der Einfallswinkel nur ausreichend flach ist.

Erfolgsrezept mit Zwiebelschichten

Ein Wolterteleskop besteht im Prinzip aus zwei aufeinander folgenden Rohren mit extrem glatten, leicht gekrümmten Innenflächen (siehe Illustration S. 55). Sie führen das einfallende Röntgenlicht nacheinander unter sehr flachen Winkeln in einem Brennpunkt zusammen. Auf die Spezialspiegel trifft allerdings nur sehr wenig Strahlung. Deshalb werden meist gleich mehrere solcher Rohre ähnlich wie Schichten einer Zwiebel ineinander verschachtelt.

Das erste derartige Röntgenobservatorium hob am 13. November 1978 von Cape Canaveral in Florida ab. Der Einstein Observatory genannte Satellit verfügte über vier Wolterspiegelpaare. Die ersten damit aufgenommenen Bilder zeigten etwa die expandierenden Wolken von explodierten Sternen. Außerdem war das Einstein Observatory 100-mal empfindlicher als frühere Missionen. Die Zahl der bekannten Röntgenquellen erreichte so die Tausende. In Europa nahm die Röntgenastronomie wenig später Fahrt

auf. 1983 startete der ESA-Satellit EXOSAT mit zwei Wolterteleskopen von 56 und 17 Zentimeter Durchmesser. Am 1. Juni 1990 begann die Mission des deutsch-britisch-US-amerikanischen Satelliten ROSAT. An ihrem Ende 1999 gab es einen Katalog des gesamten Röntgenhimmels mit mehr als 150000 Einträgen.

Die Wolterteleskope lösten auch das Rätsel des aus allen Richtungen einprasselnden Röntgenhintergrunds, den schon Giacconi und sein Team beim ersten Raketenflug 1962 bemerkt hatten. Die diffuse Strahlung stammt von unzähligen aktiven Galaxienkernen im fernen Weltraum, in denen Materie in ein extrem massereiches Schwarzes Loch stürzt. Es handelt sich prinzipiell um den gleichen Prozess wie im Binärsystem Cygnus X-1 – nur auf einer viel größeren Skala. Ein solches Schwarzes Loch im Zentrum einer Galaxie kann viele Millionen oder sogar Milliarden Sonnenmassen enthalten. ROSAT gelang zudem, was Giacconi und seine Mitstreiter noch vergeblich aufzunehmen versucht hatten: ein Foto des Erdmonds im Röntgenlicht. Das bestätigte Giacconis ursprüngliche Idee, die für ihn mehr ein Mittel war, die Militärs von seinen Plänen zu überzeugen.

Nach dem Missionsende des Einstein Observatory 1981 brachte die USA erst 1999 einen eigenen Nachfolger ins All. Technologische Herausforderungen, aber vor allem Finanzierungsfragen verzögerten das Projekt erheblich. Das Chandra X-Ray Observatory (benannt nach dem indischen Physiker Subrahmanyan Chandrasekhar) startete schließlich am 23. Juli 1999, nur fünf Monate vor seinem europäischen Pendant und ROSAT-Nachfolger XMM-Newton. Aus wissenschaftlicher Sicht passte der Zeitplan, denn Chandra und XMM-Newton ergänzen sich hervorragend. Der NASA-Satellit verfügt über besonders glatt gearbeitete Metallflächen und gestattet eine unerreichte Detailschärfe. Das europäische Teleskop hingegen punktet mit 58 ineinander geschachtelten Spiegelpaaren. Deren enorme Gesamtfläche macht den Späher besonders empfindlich. Beide sind bis heute im Einsatz und liefern beständig faszinierende Einblicke in den Röntgenhimmel (zu Chandra siehe den nachfolgenden Artikel).

In den vergangenen zwei Jahrzehnten widmete sich eine ganze Flotte weiterer Raumfahrzeuge ganz oder teilweise dem Röntgenhimmel. Dazu gehören seit 2002 der europäische INTEGRAL, seit 2012 der US-amerikanische NuSTAR, von 2005 bis 2015 der japanische Suzaku und seit 2019 das in Deutschland entwickelte und gemeinsam mit Russland gestartete Teleskop eROSITA. Unterdessen sind Chandra und XMM-Newton zuverlässige Arbeitspferde der Röntgenastronomen geblieben.

Bezüglich zukünftiger Projekte sind die Planungen für das europäische Advanced Telescope for High Energy Astrophysics (ATHENA) am weitesten vorangeschritten. Es könnte 2031 starten. Ursprünglich sollte es in Zusammenarbeit mit der NASA konstruiert werden, doch diese zog sich wegen Budgetproblemen aus dem Projekt zurück. Eine Konzeptstudie für das US-amerikanische Lynx X-Ray Observatory wurde erst im Sommer 2019 veröffentlicht. Es hätte eine bessere Detailschärfe als ATHENA. So könnten sich Lynx und sein europäisches Gegenstück in der Zukunft ähnlich ergänzen wie heute Chandra und XMM-Newton. ◀

ASTRONOMIE RÖNTGENBLICK FÜR DEN KOSMOS

Das Chandra-Weltraumteleskop ist seit zwei Jahrzehnten in der Erdumlaufbahn. Von dort aus liefert es faszinierende Aufnahmen von Galaxien, Sternen und Planeten im Röntgenlicht.



Belinda J. Wilkes ist Astrophysikerin am Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge, Massachusetts, und Direktorin des dortigen Chandra X-ray Center, das für den Betrieb des Satelliten zuständig ist.

► spektrum.de/artikel/1736692

Stellarer Trümmerhaufen

Tief im Herzen des so genannten Krebsnebels befindet sich ein Neutronenstern – der Überrest einer gewaltigen Explosion, die sich im Jahr 1054 als Supernova zeigte. Die Aufnahme umfasst verschiedene Wellenlängen im Röntgenlicht (violett), Ultraviolett (blau), sichtbaren Licht (grün), Infrarot (gelb) und Radiobereich (rot). Der schnell rotierende Neutronenstern beschleunigt mit seinem intensiven Magnetfeld geladene Teilchen in seinem Umfeld stark, wodurch sie intensive Röntgenstrahlung aussenden.

Tanz der Sterne

Die auch Whirlpool genannte Galaxie M51 offenbart eine deutlich ausgeprägte Spiralstruktur. Aufnahmen im Röntgenbereich enthüllen mehr als 400 Röntgenquellen, die meisten davon in Gebieten ungewöhnlich starker Sternentstehung. Vermutlich schleudert die Wechselwirkung von M51 mit ihrem Begleiter (oben im Bild) dort Materie besonders intensiv aufeinander. Strahlungspulse aus einem der zahlreichen Doppelsternsysteme deuten auf einen kompakten Neutronenstern hin, der seinem Nachbarn viel Materie entzieht. Das große Bild kombiniert Chandra-Aufnahmen im Röntgenlicht (Mitte) mit Bildern des Hubble-Weltraumteleskops in sichtbaren Wellenlängen (rechts).



► Röntgenstrahlung ist der beste Weg, um den energiereichsten Prozessen im All nachzuspüren, von extrem massereichen Schwarzen Löchern bis zu den Überresten von Supernovae. Seit 1999 betreibt die US-Raumfahrtbehörde NASA das Weltraumobservatorium Chandra eigens zu diesem Zweck. Es kann mit seinem Detektor Photonen aus einem breiten Spektrum des Röntgenlichts in einer zuvor unerreichten Bildqualität aufzeichnen. Das hat revolutionäre Einsichten in einige der größten Mysterien des Kosmos geliefert.

Das Teleskop war konstruiert worden, um wichtige Fragen in der Röntgenastronomie zu klären, etwa die nach den genauen Ursprungsorten von energiereicher Strahlung aus allen Richtungen des Himmels, dem so genannten Röntgenhintergrund (siehe voriger Artikel). Darüber hinaus sollte es sozusagen ein Generalobservatorium für verschiedenste Zwecke werden, bei dem sich Arbeitsgruppen rund um die Welt jährlich mit ihren Projekten um Beobachtungszeit bewerben können. Selbst nach zwei Jahrzehnten Betrieb gehen heute immer noch jedes Jahr rund 500 bis 650 Anträge ein, die insgesamt 5,5-mal so viel Messzeit beanspruchen würden, wie wir am Chandra X-ray Center anbieten haben.

Entsprechend reich war die wissenschaftliche Ausbeute. Bald waren tausende supermassereiche Schwarze Löcher in den Zentren anderer Galaxien als Quellen des Röntgenhintergrunds identifiziert. Zugleich offenbarten sich bei zahlreichen Objekten am Himmel neue, rätselhafte Vorgän-

ge. Schwarze Löcher, die intensiv strahlende Jets ausstoßen, während sie sich Materie einverleiben; ein heller Schein in Jupiters Atmosphäre; Blitze von kollidierenden Neutronensternen, welche wiederum zuvor mit Hilfe von Gravitationswellendetektoren aufgespürt wurden; dazu besondere Schwarze Löcher, die als ultraleuchtkräftige Röntgenquellen fungieren. Beobachtungen mit Chandra führen eine weltweite Gemeinschaft von mehr als 4000 Wissenschaftlern zusammen und haben bisher für über 8000 Veröffentlichungen gesorgt.

Ich kam drei Jahre vor dem Start ins Missionsteam, habe die zugehörige Website mit aufgebaut, Informationen für die Nutzer zusammengestellt, die ersten Anträge mit begutachtet und das Teleskop während der Vorbereitungen kalibriert. Die Arbeitsfülle während all dieser Tätigkeiten war enorm und trotzdem noch nichts im Vergleich zu dem, was in den Monaten nach dem erfolgreichen Start folgte. Nun hat Chandra sein 20-jähriges Dienstjubiläum hinter sich, und ich bin inzwischen Direktorin des Chandra X-ray Center, das für den Betrieb des Teleskops zuständig ist. Wir erwarten, dass es – gerade auch im Zusammenspiel mit neuen Observatorien wie dem Event Horizon Telescope und dem James Webb Space Telescope – noch viele weitere Jahre neue Erkenntnisse über die gewaltigsten Vorgänge im Universum liefern wird. ◀

Dunkle-Materie-Spuren

Eines der bekanntesten Bilder auf Basis von Chandra-Daten ist die Aufnahme des »Bullet-Cluster«, zweier sich durchdringender Galaxienhaufen. Das Bild kombiniert verschiedene Wellenlängenbereiche, wobei heißes Gas im Röntgenlicht strahlt (pink). Die Art, wie die Gravitation im Bullet-Cluster die scheinbare Form der Galaxien im Hintergrund beeinflusst, während sich deren Licht auf zu uns bewegt, bringt Astronomen auf die Spur der unsichtbaren Dunklen Materie (blau). Die Trennung von heißer und Dunkler Materie lässt sich so deuten, dass diese mysteriöse Substanz mit nichts stark wechselwirkt und deshalb alles mühelos durchdringt, während sich das sichtbare Gas bei der Kollision ausbremst.

Überraschender Jet

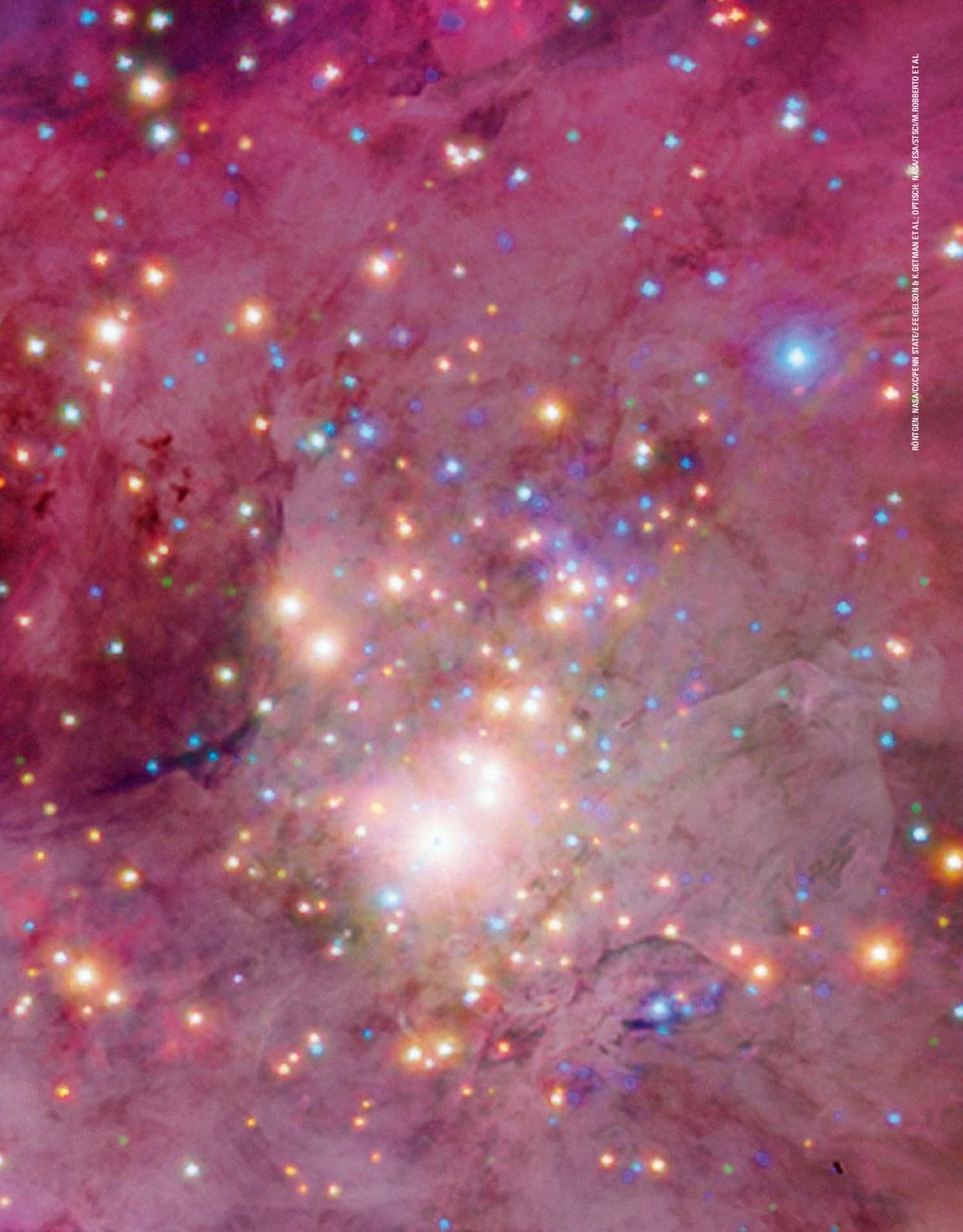
Eines der ersten Beobachtungsziele für Chandra war der Quasar PKS 0637-752, den die Autorin bereits ein Jahrzehnt zuvor anhand von Daten des Einstein-Observatoriums der NASA untersucht hatte. Im Zentrum der Galaxie befindet sich ein supermassereiches Schwarzes Loch, das seiner Umgebung Unmengen an Materie entzieht. Während diese hineinstürzt, heizt sie sich enorm auf und wird heller als alle 100 Milliarden Sterne der Galaxie zusammen.

Rechts im Bild schießt ein Strahl heraus.

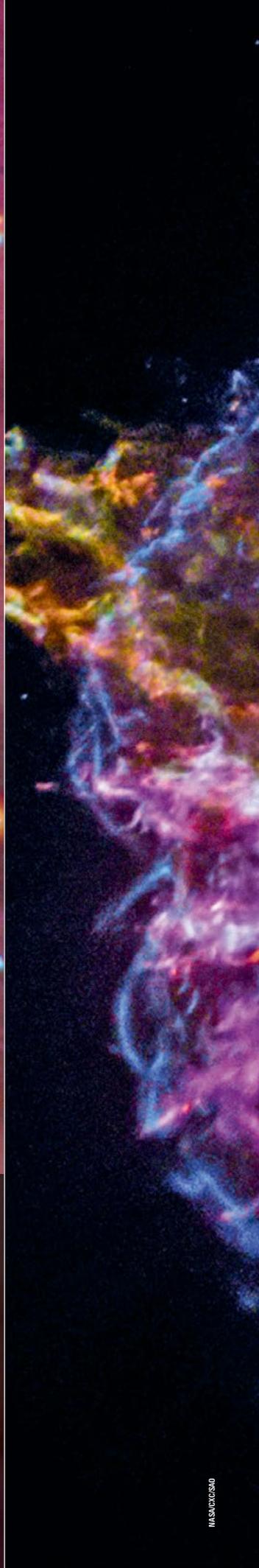
Das war eine völlig überraschende Beobachtung – das Chandra-Team vermutete zunächst einen Fehler in den optischen Elementen des Teleskops. Tatsächlich handelt es sich um Röntgenlicht eines so genannten Jets aus Plasma, der von der einfallenden Materie ausgestoßen wird. Der Jet war aus dem viel energieärmeren Radiowellenbereich bekannt, aber niemand hatte damit gerechnet, dass sich sein Leuchten bis ins Röntgenspektrum erstrecken würde. Die Beobachtung hat die Modelle zur Entstehung solcher Jets deutlich verbessert.

Leuchtender Riesenplanet

Auch in unser Sonnensystem bietet Chandra neue Einblicke. Sowohl der Nordpol (oben) als auch der Südpol (rechts) des Jupiters senden Röntgenstrahlung aus. Dabei lenken Magnetfelder geladene Teilchen aus den Äquatorregionen zu den Polen. Zusammen mit der Raumsonde Juno, die Jupiter umkreist, sollen eingehendere Untersuchungen mit Chandra den Entstehungsmechanismus aufklären. Dazu hat die Autorin einen Teil des Kontingents an Beobachtungszeit verwendet, das ihr als Direktorin zur freien Verteilung zur Verfügung steht.



ROHTRICH: MASAKOCHIPEMI, STATE/EFERELSON & KETMAN ET AL.; OPTISCH: MASUYAMA, STOSCHIM, ROBERTO ET AL.

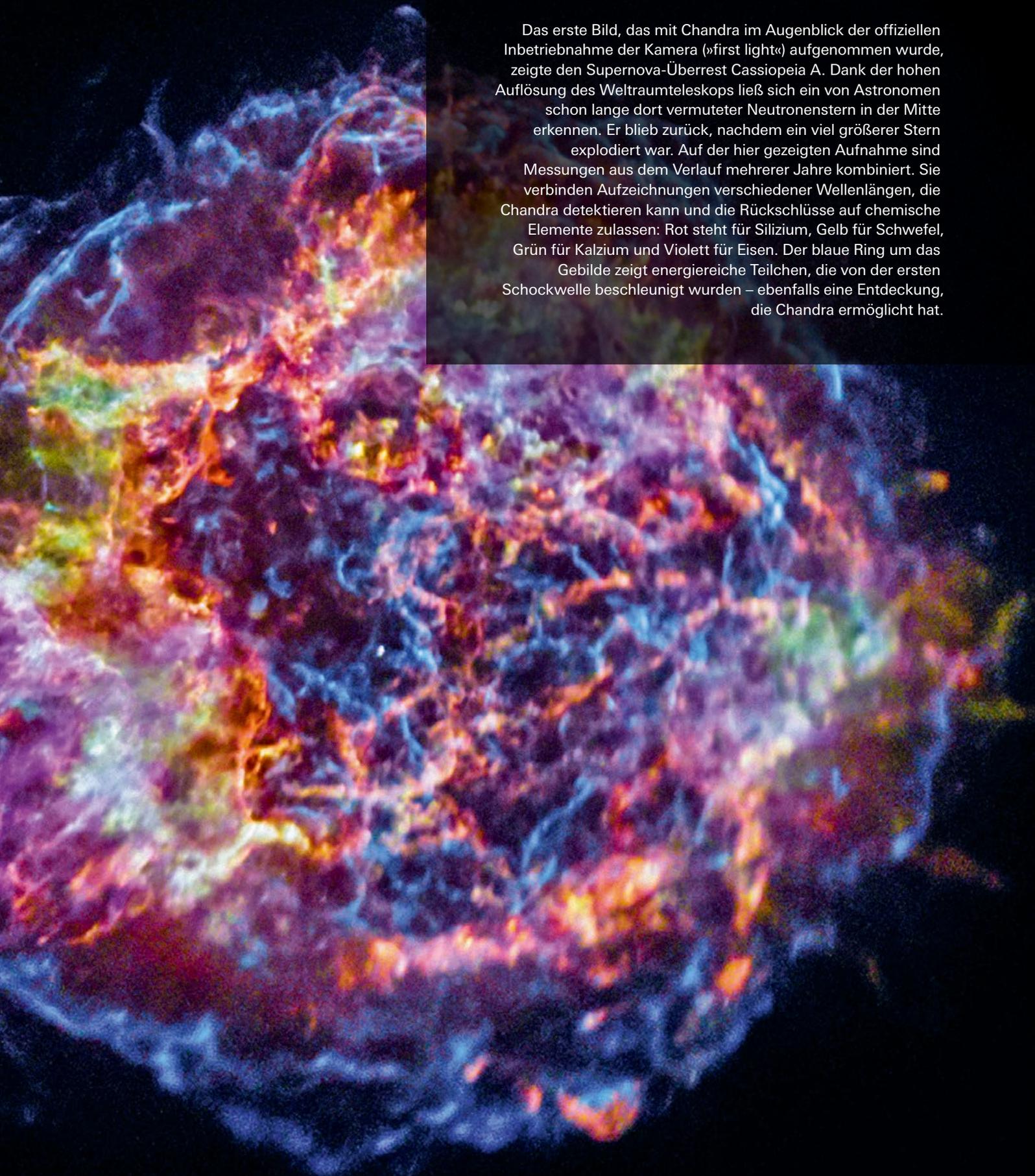


Stellare Kinderstube

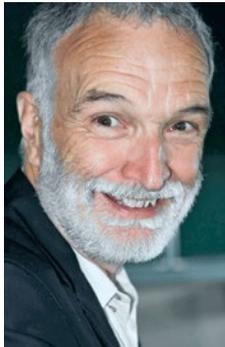
Verborgen in einem kosmischen Nebel im Schwert des Orion befinden sich mehr als 1400 junge Sterne (blau und orange). Mit Teleskopen, die nur sichtbares Licht einfangen, sind sie nicht zu erkennen. Aber die Röntgenstrahlung durchdringt den dichten Schleier aus Gas und Staub und enthüllt die Objekte für Chandra. Gerade entstehende Sterne leuchten in diesem Wellenlängenbereich besonders intensiv, da sie viel Materie aus ihrer Umgebung anziehen, in ihren starken Magnetfeldern beschleunigen und wieder herausschleudern.

Erstes Licht

Das erste Bild, das mit Chandra im Augenblick der offiziellen Inbetriebnahme der Kamera (»first light«) aufgenommen wurde, zeigte den Supernova-Überrest Cassiopeia A. Dank der hohen Auflösung des Weltraumteleskops ließ sich ein von Astronomen schon lange dort vermuteter Neutronenstern in der Mitte erkennen. Er blieb zurück, nachdem ein viel größerer Stern explodiert war. Auf der hier gezeigten Aufnahme sind Messungen aus dem Verlauf mehrerer Jahre kombiniert. Sie verbinden Aufzeichnungen verschiedener Wellenlängen, die Chandra detektieren kann und die Rückschlüsse auf chemische Elemente zulassen: Rot steht für Silizium, Gelb für Schwefel, Grün für Kalzium und Violett für Eisen. Der blaue Ring um das Gebilde zeigt energiereiche Teilchen, die von der ersten Schockwelle beschleunigt wurden – ebenfalls eine Entdeckung, die Chandra ermöglicht hat.



SCHLICHTING! RINGELNDE KONDENSSTREIFEN



In großer Höhe erzeugen die Abgase eines Flugzeugs häufig lang gestreckte Bänder aus Eiskristallen. Es scheint, als lägen die Kondensstreifen ruhig in der Luft – tatsächlich sind sie voller Bewegungen. Sie rotieren in der Regel gegensinnig zueinander und zerfallen manchmal in ringartige Elemente.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für »Spektrum« über physikalische Alltagsphänomene.

» spektrum.de/artikel/1736694

Am Himmel zeigten sich weiße Schrammen

Guy Helminger (*1963)

► Zum Frühjahr 2020 sind Kondensstreifen plötzlich eine seltene Himmelserscheinung geworden. Sonst war der Himmel von ihnen oft regelrecht vollgekritzelt, denn die Flugzeugspuren können je nach den meteorologischen Bedingungen sehr lange bestehen bleiben (siehe Foto rechts). Ihr auffälliges Fehlen infolge der weltweiten Einschränkungen des Reiseverkehrs macht bewusst, wie vertraut sie uns inzwischen geworden sind – fast wie natürliche Wolken.

Wer sie nun doch einmal beobachten kann, ist jetzt vielleicht umso mehr geneigt, genauer hinzuschauen. Dabei zeigt sich, dass die Streifen oft eine interessante Dynamik aufweisen bis hin zu drastischen Strukturänderungen und Verwirbelungen, hinter denen sich komplexe physikalische Vorgänge verbergen. Zumindest anfänglich sind die Linien noch schnurgerade. Das ist ein typisches Zeichen für ihren technischen Ursprung. Ihre Verursacher fliegen auf festem Kurs mit Geschwindigkeiten von um die 900 Kilometer pro Stunde und ziehen dabei die nebelartigen Bänder hinter sich her.

Bei der Entstehung spielt kondensierendes und gefrierendes Wasser die zentrale Rolle. Wasserdampf ist zum einen ein wesentlicher Bestandteil der Abgase der Flugzeuge selbst, zum anderen ist er bereits in der Atmosphäre vorhanden. Damit er allerdings kondensiert, muss die absolute Feuchte (das ist die tatsächliche Wassermenge in der Luft) größer sein als die maximale. Sonst lösen sich die Streifen schnell wieder auf oder entstehen gar nicht erst. Die maximale Feuchte sinkt in der Atmosphäre mit abnehmender Temperatur. In einer Flughöhe von zehn Kilometern herrschen meist minus 50 bis minus 60 Grad

H. JOACHIM SCHLICHTING



Bei hoher Luftfeuchtigkeit können sich Kondensstreifen zu einer großflächigen Bewölkung auswachsen.

Celsius. Dennoch bilden sich dort oft noch keine Eiskristalle, selbst wenn die maximale Feuchte die absolute unterschreitet. Wegen der großen Reinheit der Luft fehlen nämlich Keime, an denen Wasserdampf kondensieren und gefrieren könnte. Solche Partikel gibt es in der Abgasfahne der Flugzeuge dagegen reichlich.

Die Kondensstreifen erkennt man erst ein Stück weit hinter dem Flugzeug. Denn zum einen müssen sich die Rauchgase genügend abkühlen, bevor Wasserdampf in die flüssige oder gefrorene Phase übergehen kann. Zum anderen sind die entstehenden Tröpfchen beziehungsweise Eiskristalle anfangs so klein, dass sie das Licht nicht stark genug streuen, um sichtbar zu sein. Bei sehr großer Feuchte beobachtet man zuweilen Kondensstrei-

fen auch bei höherer Umgebungstemperatur in geringerer Höhe. Sie bestehen dann meist nicht aus Eiskristallen, sondern nur aus kondensiertem Wasserdampf.

Natürliche Wolken haben komplizierte Strukturen. Die Kondensstreifen hingegen erscheinen zunächst als einfache Linien. Darum kann man an ihnen sehr leicht Veränderungen feststellen und Rückschlüsse auf meteorologische Vorgänge und Strömungen ziehen.

Die Wolkenpaare wechseln von gerader Linie zum wilden Tanz

Ein besonders verworrenes Phänomen sind verwirbelte Paare von Kondensstreifen (siehe Fotos rechts). Führen vielleicht starke Winde dazu? Wenn man dann aber sieht, dass andere Flugzeuge, die in ähnlichen Regionen unterwegs sind, gerade und langlebige parallele Streifen hinter sich lassen, muss es einen anderen Grund für die Strukturbildung geben.

Bei der Lösung des Problems hilft eine weitere Beobachtung: An den Flügelspitzen der Flugzeuge entstehen manchmal völlig unabhängig von den Abgasen Nebelfäden. Es handelt sich dabei um so genannte Randwirbel infolge starker Strömungen an den Tragflächen. Diese drücken, um das Flugzeug oben zu halten, die Luft nach unten. Daraufhin kommt es weiter außen zu einer Ausgleichsströmung von unten nach oben. Zusammen mit der Vorwärtsbewegung des Flugzeugs wickelt sich die Luft um beide Flügelspitzen zu entgegengesetzt zueinander rotierenden Zöpfen auf (siehe Illustration unten).

Bei großer Feuchtigkeit werden die Randwirbel sogar sichtbar. Denn in der von ihnen beschleunigten Luft nimmt der Luftdruck stark ab, woraufhin die Temperatur unter den Taupunkt sinken kann. In der Folge taucht eine Schnur aus Wassertröpfchen auf (siehe »Spektrum« April 2010, S. 32).

Um die Druckunterschiede zwischen Ober- und Unterseite einer Tragfläche auszugleichen, entstehen an den Flügelspitzen Randwirbel aus rotierender Luft. Sie regen die Kondensstreifen, die sich ein Stück hinter den Triebwerken bilden, zu Schwingungen an.



Oft treten die beiden gegensinnig rotierenden Kondensstreifen miteinander in Wechselwirkung und zerfallen allmählich.



Die Randwirbel greifen nach kurzer Zeit auf die Abgasströmung über und rollen auch sie zu entgegengesetzt rotierenden Wirbeln auf. In dieser Phase können sich zunächst kleine turbulente Störungen entlang der Wirbelachsen bilden. Dazu genügt es, wenn sich die Lufttemperatur oder die Dichte plötzlich ändert.

Die Störungen schaukeln sich mitunter zu raumgreifenden Schwingungen auf. Dabei pendelt der Abstand der Wirbel zueinander entlang der Flugrichtung mit einer Wellenlänge von zirka dem Sechsfachen der Flügelspannweite. Diese nach ihrem Entdecker Crow-Instabilität genannte Tendenz, zu schwingen, wird schließlich so stark, dass sich die Wirbel an den schmalsten Stellen berühren und miteinander wechselwirken. Durch den Effekt zerfallen die Kondensstreifen in annähernd ringförmige Stücke.

Die Reste verdünnen sich weiter, und bald ist vom ehemaligen Streifen nichts mehr zu erkennen. In manchen Fällen verschwinden die Nebel aus Eiskristallen spurlos. Oft wachsen sie aber zu einer Zirusbewölkung aus, die in vielen Fällen sonst nicht entstanden wäre. Sie reflektiert einerseits Sonnenlicht zurück ins All, bevor es den Erdboden erreicht, und hält andererseits Strahlung der Erde zurück. Netto überwiegt Untersuchungen zufolge der wärmende Effekt auf das Klima, wobei viele Details noch unbekannt sind. Die weitgehende Reduktion des kommerziellen Luftverkehrs durch die Coronakrise könnte Kontrollwerte liefern, um zu ermitteln, wie sich die nun deutlich seltener gewordenen Kondensstreifen auf die Umwelt auswirken.

QUELLE

Gerz, T., Ehret, T.: Wingtip vortices and exhaust jets during the jet regime of aircraft wakes. *Aerospace Science and Technology* 7, 1997

INFORMATIK WIE KOMPLEX DARF ES SEIN?

Kann ein Computer die Lösung eines Problems immer in vertretbarer Zeit überprüfen, egal wie schwierig es ist? Ja, sagt ein neuer Beweis – und widerlegt damit eine ganze Reihe etablierter Vermutungen aus der Mathematik und Physik.



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

» spektrum.de/artikel/1736696

Fortschritte in der Physik beeinflussen auch die theoretische Informatik: Quantencomputer ermöglichen neue Szenarien, wenn es um die Lösung komplexer Probleme geht.

AUF EINEN BLICK DETEKTIVARBEIT MIT COMPUTERN

- 1** Um die Schwierigkeit eines Problems zu bemessen, untersuchen Informatiker unter anderem, wie kompliziert es ist, dessen Lösung nachzurechnen.
- 2** Forscher konnten nun zeigen, dass gewöhnliche Computer fast jede Art von Aufgabe überprüfen können, wenn verschränkte Quantencomputer die Lösung geliefert haben.
- 3** Dieses Ergebnis schlägt auch in der Physik und Mathematik hohe Wellen, denn es widerlegt mehrere jahrzehntealte Vermutungen aus diesen Disziplinen.

Wissenschaftler lieben es, Dinge zu kategorisieren – zumindest auf abstrakter Ebene. Chemiker teilen beispielsweise alle Elemente in das Periodensystem ein, Biologen ordnen Lebewesen nach Familien und Arten, und Mathematiker haben im vergangenen Jahrzehnt, nach langer Suche, alle endlichen einfachen Gruppen gefunden und aufgelistet.

Informatiker suchen ebenfalls nach Ordnung, wenn auch ein wenig anders: Sie sortieren Probleme nach ihrer Komplexität. Bereits in der Vergangenheit haben sie herausgefunden, dass gewisse Aufgaben für Computer sehr einfach zu lösen sind. Bei ihnen wächst mit der Länge des Problems die zur Lösung nötige Rechenzeit bloß langsam (polynomial) an. Aus Sicht von Informatikern gehören sie damit zur so genannten Komplexitätsklasse P.

Probleme, die schwer zu lösen sind, sich aber einfach überprüfen lassen, zählen zur Klasse NP. Ein Beispiel ist ein anspruchsvolles Sudoku: Bei diesem ist es schwierig, die passenden Zahlen zu finden. Hat man sie jedoch einmal ausgetüftelt oder bekommt ein ausgefülltes Blatt präsentiert, lässt sich leicht überprüfen, ob es korrekt ist. Ob P und NP wirklich verschiedene Klassen sind oder ob man einfach noch keinen Algorithmus kennt, der die entsprechenden Probleme effizient löst, zählt zu den wichtigsten offenen Fragen der theoretischen Informatik. Sie ist eines der sieben Millennium-Probleme, deren Lösung das Clay Mathematics Institute mit je einer Million US-Dollar belohnt.

Mit P und NP fängt der Spaß aber erst an. Computerwissenschaftler haben mittlerweile eine Hierarchie von Komplexitätsklassen herausgearbeitet, von sehr einfachen hin zu extrem anspruchsvollen Aufgaben. Diese Einteilung ist nicht rein abstrakt, denn tatsächlich spielen dabei physikalische Komponenten eine Rolle. Die Komplexität eines Problems hängt von dem zur Lösung benötigten Speicherplatz und der beanspruchten Rechenkapazität ab. Kein Wunder also, dass Quantencomputer auch die theoretische Informatik umgewälzt haben: Sie ermöglichen neue Strategien, wenn es darum geht, Probleme zu lösen oder Ergebnisse auf ihre Korrektheit zu überprüfen.

Eine der größten Überraschungen des Jahrhunderts

Eine Frage, die Computerwissenschaftler lange beschäftigte, lautete: Wie kompliziert darf eine Aufgabe höchstens sein, damit ein gewöhnlicher Computer die Lösung in angemessener – also polynomialer – Zeit verifizieren kann? Ein Team um Zhengfeng Ji von der University of Technology in Sydney hat im Januar 2020 eine überraschende Antwort gefunden, die für großes Aufsehen unter Fachleuten gesorgt hat. Demnach lassen sich mit der richtigen Strategie rein theoretisch selbst die schwierigsten Probleme der Informatik in vertretbarer Zeit angehen.

»Ich kann mich nicht an eine einzige Person erinnern, die das erwartet hätte«, schreibt der Informatiker Scott Aaronson von der University of Texas in Austin dazu in seinem Blog. Sollte die Arbeit der Prüfung durch unabhängige Experten standhalten, handle es sich um eine der größten Überraschungen aus der theoretischen Informatik in diesem Jahrhundert.

Seit den 1970er Jahren versuchen Computerwissenschaftler, Komplexitätsklassen immer feiner zu unterteilen. Dazu haben sie Probleme identifiziert, die noch schwieriger sind als NP. Raum für mehr Komplexität bot dabei vor allem die Überprüfung eines Ergebnisses. In manchen Fällen wächst die dafür nötige Zeit nicht mehr polynomial mit der Länge der Aufgabe an, sondern etwa exponentiell. Hier ist die Sache also sehr viel schwieriger als bei einem Sudoku dessen Lösung man vorgelesen bekommt.

Um solche Probleme klassifizieren zu können, führten Informatiker in den 1980er Jahren so genannte interaktive Beweissysteme ein. Sie stellten sich dabei einen allmächtigen Computer vor, den »Beweisführer«. Dieser ist stets in der Lage, die Lösung zu einer Aufgabe zu liefern, unabhängig davon, wie komplex sie ist. Er kann folglich Probleme berechnen, die weit komplizierter sind als Sudoku. Dabei verfügt er über unendliche Speicherkapazitäten und kann im Prinzip unendlich lange rechnen.

Allerdings ist der Beweisführer nicht vertrauenswürdig, weshalb man zusätzlich einen Prüfer braucht, der das gelieferte Ergebnis nachrechnet. Beim Sudoku wäre er es, der sicherstellt, dass eine Lösung korrekt ist. Der Prüfer ist – anders als der Beweisführer – ein realistischer Computer, der über begrenzte Ressourcen verfügt. Das heißt, seine Berechnungsdauer darf bloß polynomial vom Umfang der Aufgabe abhängen.

Weil die vom Beweisführer gelieferte Lösung unter Umständen extrem lang und kompliziert ist, lässt sich das Ergebnis häufig nicht im Detail nachrechnen. Deshalb greift der Prüfer auf andere Tricks zurück, um sich vom Wahrheitsgehalt zu überzeugen. Tatsächlich ähnelt der Prozess einem Verhör: Der Prüfer stellt dem Beweisführer mehrere Fragen und testet so, ob die vorgesezte Lösung stimmt.

Zur Veranschaulichung kann man sich einen Tisch in einem stockfinsternen Zimmer vorstellen, auf dem mehrere identisch geformte Holzklötze liegen. Die Aufgabe besteht darin, sie nach ihrer Farbe zu sortieren. Der Beweisführer – allmächtig wie er ist – hat kein Problem damit. Trotz Dunkelheit teilt er die Klötze in zwei Stapel auf. Der Prüfer muss nun durch Fragen herausbekommen, ob zwei beliebig herausgegriffene Klötze von unterschiedlichen Stapeln wirklich verschiedene Farben haben.

Der Beweisführer könnte etwa sagen, dass der eine Klotz rot und der andere blau ist. Aber stimmt das? Um dies zu klären, versteckt der Prüfer die Holzklötze hinter seinem Rücken, vertauscht sie mehrmals und fragt dann den Beweisführer, welcher nun der angeblich rote sei. Wiederholt man das Experiment oft genug, wird der Beweisführer entweder in rund der Hälfte aller Fälle falschliegen (wenn er gelogen hat) oder immer richtig antworten (wenn er die Wahrheit gesagt hat).

Computerwissenschaftler haben herausgefunden, dass man für manche Aufgaben nur mit einer solchen Frage-Antwort-Strategie prüfen kann, ob ein geliefertes Ergebnis korrekt ist. Derartige Probleme erweitern die Komplexitätsklasse NP zu IP (englisch: interactive polynomial time).

Es gibt sogar eine Möglichkeit, noch schwierigere Aufgaben anzugehen: Man lässt nicht bloß einen Beweisführer, sondern gleich mehrere zu. Diese dürfen sich austauschen,

während sie eine Lösung ausarbeiten. Doch sobald sie das Ergebnis geliefert haben und der Prüfer es untersucht, sind sie voneinander getrennt.

Auf diese Weise kann die Lösung der Aufgabe, die der Prüfer anschließend mit der Frage-Antwort-Strategie beackert, noch komplizierter ausfallen – und trotzdem in polynomialer Zeit überprüft werden. Denn der Prüfer hat es leichter, wenn er zwei oder mehr Instanzen befragen kann: So wie ein Polizeikommissar bei separaten Verhören größere Chancen hat, Zeugen einer Lüge zu überführen, lassen sich auf diese Weise anspruchsvollere Probleme lösen. Die dazugehörige Komplexitätsklasse MIP ist noch größer als IP, wie Informatiker 1988 entdeckten.

Computer, die miteinander verschränkt sind

Nach diesem Ergebnis ruhte das Gebiet der interaktiven Beweissysteme erst einmal. Bis sich einige Forscher fragten, was passieren würde, wenn die beiden Beweisführer keine klassischen Computer wären, sondern Quantencomputer, die mittels so genannter Verschränkung gekoppelt sind – ein Phänomen, über das sich schon Albert Einstein den Kopf zerbrochen hat. Er nannte es »spukhafte Fernwirkung«, denn wenn man den Zustand eines von zwei verschränkten Objekten misst, legt man damit gleichzeitig auch den Zustand des anderen fest; unabhängig davon, wie weit die beiden räumlich voneinander entfernt sind. Anfangs bereitete dieser Umstand Physikern Bauchschmer-

Informatiker ordnen Probleme in Komplexitätsklassen ein. Einfache Aufgaben gehören zu P, danach werden sie immer schwieriger. Wie sich nun gezeigt hat, enthält MIP* die kompliziertesten Probleme.

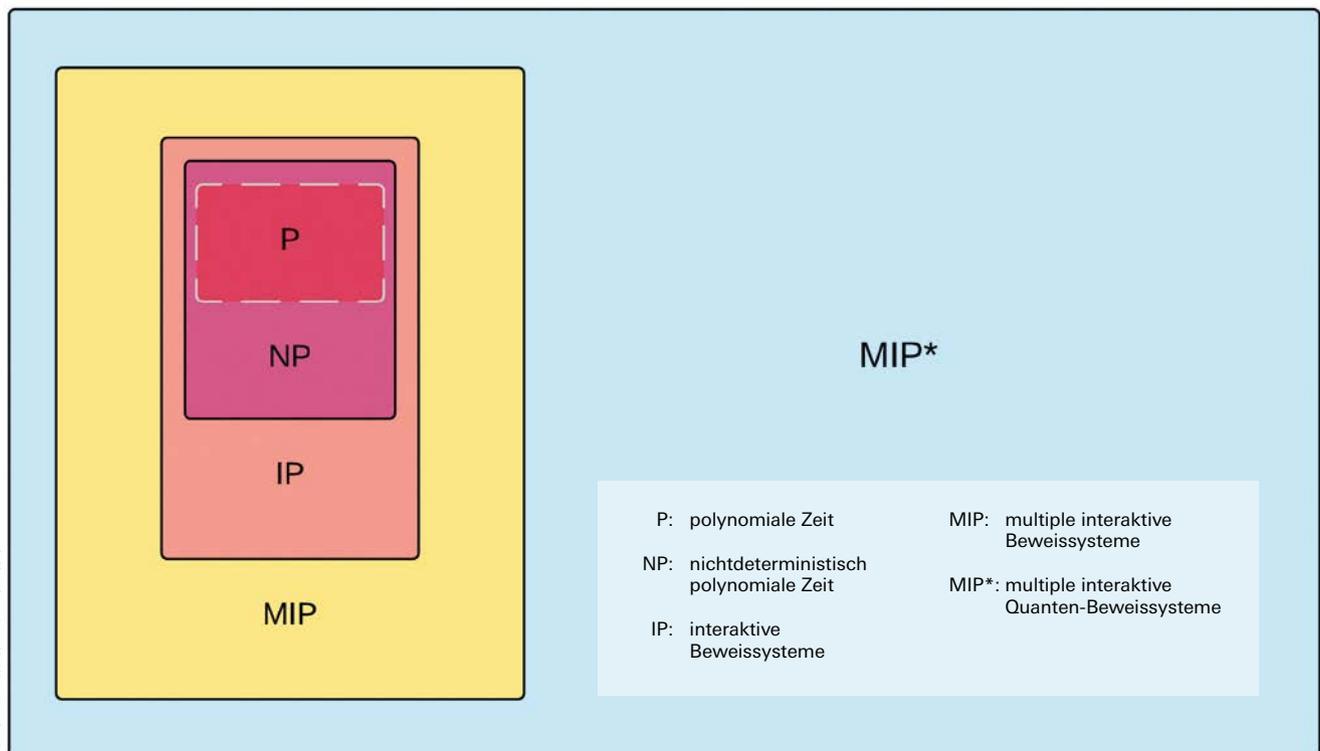
zen, doch inzwischen weiß man, dass sich so keine Information übermitteln lässt – und die Gesetze der speziellen Relativitätstheorie damit gewahrt bleiben.

Komplexitätsforscher schenken der Möglichkeit von verschränkten Quanten-Beweisführern zunächst nicht viel Aufmerksamkeit, da man davon ausging, dass die dazugehörige Komplexitätsklasse MIP* kleiner wäre als MIP oder gar IP. Schließlich liegt der Vorteil von MIP darin, dass man die allwissenden Computer separat befragt. Wenn sie aber während des Verhört verschränkt sind, wirkt sich die Antwort des einen auf den Zustand des anderen aus – sie sind nicht mehr unabhängig voneinander.

»Die natürliche Reaktion von allen inklusive mir war, dass man den Beweisführern nun mehr Macht einräumt«, so der Computerwissenschaftler Thomas Vidick vom California Institute of Technology, Mitautor der neuen Veröffentlichung. Schließlich könnten die Beweisführer die Verschränkung nutzen, um ihre Antworten während des Verhört durch den Prüfer abzustimmen.

Doch 2012 kam die erste große Überraschung: Vidick bewies mit seinem Kollegen Tsuyoshi Ito von der University of Waterloo, dass man mit verschränkten Quantencomputern alle Probleme aus MIP in polynomialer Zeit überprüfen kann. Demnach sind beide Komplexitätsklassen mindestens gleich groß.

Sieben Jahre später folgte die nächste Wendung. Die Physiker Anand Natarajan vom California Institute of Technology und John Wright vom Massachusetts Institute of Technology entdeckten, dass die Quantencomputer-Klasse MIP* sogar größer ist als MIP. Demnach muss die Verschränkung kein Nachteil sein, sondern der Prüfer kann sie sogar zu seinem Vorteil nutzen – und auf diese Weise noch komplexere Aufgaben angehen als gedacht.



Der Trick besteht darin, mit Hilfe der Verschränkung geeignete Fragen zu formulieren. Das heißt, die Beweisführer befragen sich zunächst selbst. Das mag auf den ersten Blick paradox erscheinen; weil die zwei Beweisführer aber miteinander verschränkt sind, können sie mehrere Antworten gleichzeitig durchspielen und so in kürzerer Zeit mehr denkbare Überprüfungsschritte abhandeln. Diese Fragen übermitteln sie dem Prüfer.

Der muss beim eigentlichen Test dann nur noch garantieren, dass die Fragen genügend Fakten einholen, um den Wahrheitsgehalt wirklich beurteilen zu können. Zudem müssen sie sinnvoll gestellt sein und die dazugehörigen Antworten dürfen zu keinen Widersprüchen führen. All diese Kriterien lassen sich in angemessener Zeit prüfen, wodurch ein gewöhnlicher Computer ein geliefertes Ergebnis verifizieren kann. Die dafür benötigte Rechendauer wächst bloß polynomial mit der Länge des Problems an.

Die heisenbergsche Unschärfe als Lösung

Bei diesem Verfahren muss man allerdings sicherstellen, dass – selbst wenn die Fragen der Beweisführer quantenmechanisch zusammenhängen – die dazugehörigen Antworten nicht auch verschränkt sind. Denn das käme zwei Verdächtigen gleich, die sich während eines Verhörs absprechen.

Natarajan und Wright lösten das Problem, indem sie ein weiteres bizarres Konzept aus der Quantenmechanik nutzten: die dem Mikrokosmos inwohnende Unschärfe, der zufolge sich zwei »komplementäre« Eigenschaften eines Objekts, etwa Ort und Geschwindigkeit, nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmen lassen. Hat man beispielsweise

die Geschwindigkeit eines Teilchens gemessen und ermittelt danach seine Position, verschwimmt das erste Resultat. Es lässt sich nicht mehr exakt angeben, wie schnell das Objekt nun ist.

Die Beweisführer dürfen deshalb während des Verhörs bloß komplementäre Berechnungen durchführen, so dass sie ihre Antworten nicht aufeinander abstimmen können. Befragt man den ersten Quantencomputer nach einem Rechenwert, löscht das die dazugehörige Information des zweiten Quantencomputers.

Damit wussten Informatiker, dass MIP* die Komplexität von MIP übersteigt. Doch wie groß die Klasse wirklich ist, war zunächst unklar. Um wie viel besser lassen sich Lösungen überprüfen, wenn man verschränkte Quantencomputer befragt? Tatsächlich scheint dies die Menge der Aufgaben auf maximale Art und Weise zu vergrößern. Wie Zhengfeng Ji zusammen mit Natarajan, Vidick, Wright und Henry Yuen von der University of Toronto nun in ihrem Aufsehen erregenden Fachaufsatz gezeigt haben, enthält MIP* sämtliche berechenbaren Probleme der Informatik!

Dem Beweis zufolge ist MIP* identisch mit der riesigen Komplexitätsklasse RE. Sie umfasst alle Entscheidungsprobleme (solche, deren Antwort Ja oder Nein lautet), die ein Computer in endlicher Zeit bejahen kann. Darunter fällt unter anderem die hartnäckigste aller Aufgaben, das berühmte Halteproblem. Dabei geht es darum, zu bestimmen, ob ein Computer bei einer Berechnung jemals anhalten kann – oder für immer weiterrechnet.

Der britische Informatiker Alan Turing bewies zwar 1936, dass es keinen Algorithmus gibt, der das Halteproblem allgemein lösen kann. Das widerspricht allerdings nicht der neuesten Veröffentlichung. Denn die Arbeit von Ji und

Quanten-Spiele

Als Physiker Anfang des 20. Jahrhunderts die Quantenmechanik entwickelten, zweifelten viele Experten die neue Theorie an. Einige der daraus abgeleiteten Effekte schienen zu verrückt, um wahr zu sein. Ein prominentes Beispiel dafür ist die Verschränkung. Gemäß der Quantenphysik können mehrere Teilchen auf seltsame Weise gekoppelt sein und sich dadurch augenblicklich gegenseitig beeinflussen – unabhängig davon, wie weit sie voneinander entfernt sind.

Unter anderem fochten Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen diese Vorstellung an. Ihrer Meinung nach handelte es sich bei der Quantenphysik um

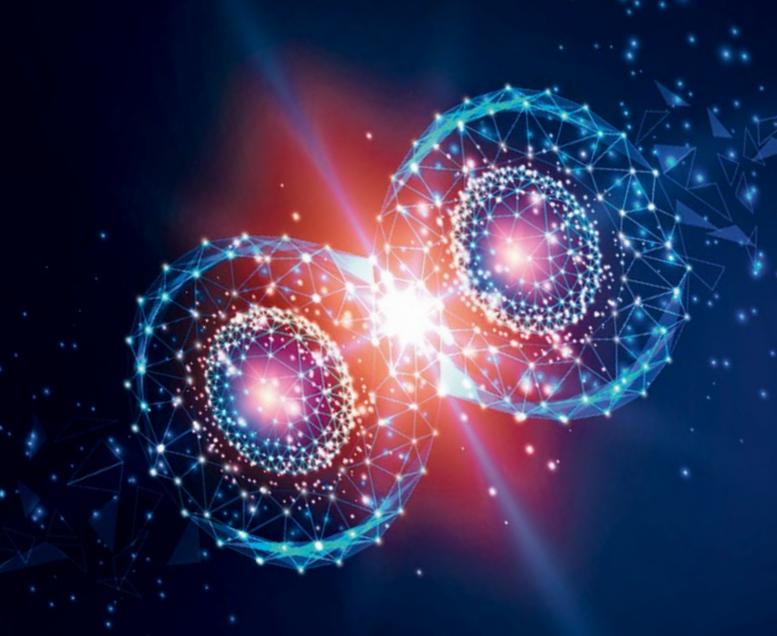
eine unvollständige Theorie. Phänomene wie Verschränkung tauchten ihnen zufolge nur auf, weil man zu wenig über die tatsächliche Physik wisse.

Um diese These zu testen, veröffentlichte John Bell 1964 eine Arbeit, in der er eine Art Quanten-Spiel vorstellte. Dabei versuchen zwei Spieler gemeinsam eine Aufgabe zu lösen. Wie das Spiel bei häufigen Wiederholungen ausgeht, hängt dabei davon ab, ob die Quantentheorie vollständig ist oder nicht. Hätten Einstein, Rosen und Podolsky Recht, dann könnte die Anzahl der Gewinne einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Folgt der Mikrokosmos jedoch den Gesetzen der Quantenphysik

und die Spieler können verschränkt sein, dann gewinnen sie wesentlich häufiger.

Solche Gedankenspiele wurden inzwischen etliche Male experimentell umgesetzt. Meist übernahmen dabei verschränkte Photonen die Rolle der Spieler. Wie die Versuche zeigten, lagen Einstein, Podolsky und Rosen falsch.

Ein ähnliches Quanten-Spiel entwickelte auch der theoretische Informatiker Zhengfeng Ji mit seinen Kollegen, um eine mathematische Vermutung zu widerlegen. Doch anders als die Gedankenexperimente von Bell, umfasst das Spiel unendliche Größen, wodurch es sich nicht ohne Weiteres im Labor überprüfen lässt.



INDIV / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die Informatiker haben gezeigt, dass man – gerade in der Quantenmechanik – Unendlichkeiten nicht immer durch große endliche Systeme annähern kann.

seinen Kollegen besagt, dass ein gewöhnlicher Prüfer in polynomialer Zeit die Aussage von zwei miteinander verschränkten allwissenden Quantencomputern überprüfen kann, der zufolge ein Computer für eine bestimmte Aufgabe zum Halten kommt. Behauptungen, dass ein Programm beispielsweise in einer Endlosschleife stecken bleiben wird, lassen sich so aber nicht verifizieren.

Computerwissenschaftliches Ergebnis widerlegt mathematische Vermutung

Das Ergebnis hat theoretische Informatiker verblüfft. Unerwarteterweise wirkt es sich aber auch auf andere Fachbereiche aus. Denn dadurch entpuppt sich das in den 1970er Jahren vom Fields-Medaillen-Preisträger Alain Connes formulierte »Einbettungsproblem« aus der Funktionalanalysis als falsch – was viele Wissenschaftler erstaunt. Von diesem hängen wiederum weitere Hypothesen ab, wie die quantenmechanische Vermutung des russisch-israelischen Mathematikers Boris Tsirelson (1950–2020), die folglich ebenso wenig stimmen. »Wenn ich eine Veröffentlichung mit der Überschrift $MIP^* = RE$ sehe, dann gehe ich erst einmal davon aus, dass sie nichts mit meiner Arbeit zu tun hat«, sagte der Quantenphysiker Miguel Navascués von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Wien. »Das war eine echte Überraschung.«

Das Einbettungsproblem handelt unter anderem von so genannten Operatoralgebren, die zum mathematischen Bereich der Funktionalanalysis gehören, aber auch in der Quantenmechanik auftauchen. Dort hängen sie beispielsweise mit dem physikalischen Phänomen der Verschränkung zusammen. Denn es ist immer noch nicht vollkommen klar, wie man verschränkte Teilchen mathematisch korrekt beschreibt.

Bislang gibt es unterschiedliche Ansätze, die zwei verschiedenen Ansichten widerspiegeln: Beim ersten geht man davon aus, dass sich die Physik aus einzelnen Bestandteilen heraus aufbaut. Das heißt man beschreibt ein

System verschränkter Teilchen als Produkt der möglichen Zustände der einzelnen Partikel. Der andere Ansatz betrachtet ein System als Ganzes und prüft, ob es sich vielleicht in kleinere Teile zerlegen lässt. Wenn das möglich ist, unterscheiden sich beide Vorgehensweisen nicht. Doch insgesamt ist die zweite allgemeiner, denn sie handelt Systeme ab, die sich nicht so einfach zerstückeln lassen.

Vom mathematischen Standpunkt aus kann man verschränkte Zustände im ersten Fall durch Matrizen beschreiben, eine Art Liste von Zahlen. Im zweiten Fall kommt man mit Matrizen – die endlich viele Zeilen und Spalten haben – allerdings nicht aus. Man braucht so genannte Operatoren, die unter Umständen unendlich-dimensional sind. Das macht es viel schwerer, mit ihnen umzugehen.

Connes vermutete 1976, dass sich bestimmte unendlich-dimensionale Operatoren durch extrem große Matrizen annähern lassen. Sprich: Statt mit den abstrakten Objekten zu rechnen, kann man Matrizen nutzen, um eine Aufgabe zu lösen. Tsirelson übertrug diese Hypothese auf die Quantenmechanik, indem er annahm, dass die zwei unterschiedlichen Beschreibungen von Verschränkung im Wesentlichen gleich sind. Wie sich später herausstellte, sind Tsirelsons Vermutung und Connes Einbettungsproblem zwei Seiten der gleichen Medaille: Wenn es gelingt zu zeigen, dass eine der beiden Aussagen zutrifft, hat man die andere gleichzeitig mitbewiesen.

Doch nun hat die neueste Arbeit der theoretischen Informatiker Tsirelsons Vermutung und damit auch Connes Einbettungsproblem widerlegt. Das hat drastische Folgen: Anders als häufig angenommen, kann man ein unendliches System nicht immer beliebig genau durch ein endliches annähern.

Ji und seine Kollegen beschreiben in ihrer Veröffentlichung ein Beispiel für eine Situation, in der dieser Fall eintritt. Dazu konstruierten sie ein Spiel, an dem zwei Personen teilnehmen, die miteinander verschränkt sind (siehe »Quanten-Spiele«, links) und das Spiel entweder gemeinsam gewinnen oder verlieren können. Beschreibt man den Zustand beider Personen durch unendlich-dimensionale Operatoren, dann gewinnen die Spieler bei optimaler Strategie mit einer Chance von 1, also immer; verwendet man dagegen endliche Matrizen, dann beträgt die Wahrscheinlichkeit dafür höchstens $\frac{1}{2}$. Folglich kann man mit endlichen Matrizen niemals beliebig nah an das Ergebnis der Operatoren herankommen, unabhängig davon, wie groß man sie wählt.

Damit hat die Arbeit der theoretischen Informatiker nicht bloß Auswirkungen auf die Komplexitätstheorie. Das zeigt, dass das Gebiet – anders als häufig behauptet – kein völlig lebensferner Bereich ist, das allein für sich steht, sondern auch andere Disziplinen beeinflusst, wie die theoretische Quantenphysik und Mathematik. ◀

QUELLEN

Ito, T., Vidick, T.: A multi-prover interactive proof for NEXP sound against entangled provers. ArXiv 1207.0550, 2012

Ji, Z. et al.: $MIP^* = RE$. ArXiv 2001.04383, 2020

Natarajan, A., Wright, J.: NEXP in MIP^* . ArXiv 1904.05870, 2019

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN DIE KUNST DES GUTEN PASSWORTS

Viele Menschen verzweifeln an der Wahl sicherer Kennwörter, denn diese sollten aus möglichst vielen, willkürlich gewählten Zeichen bestehen und sich für jedes Benutzerkonto unterscheiden. Weil das nur in den wenigsten Fällen gelingt, treffen Anbieter im Internet subtile Vorsichtsmaßnahmen, um die Daten ihrer Nutzer zu schützen.



Jean-Paul Delahaye ist emeritierter Professor der Université de Lille und Forscher am Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (Cristal).

► spektrum.de/artikel/1736698

► Sicher kennen Sie die Situation: Sie registrieren sich auf einer Webseite und wählen ein Kennwort, das kurzerhand abgelehnt wird, weil es zu einfach ist. Nach mehreren Fehlschlägen denken Sie sich schließlich eine lange und komplizierte Zeichenfolge aus. Wenn Sie das nächste Mal ein Benutzerkonto auf einer unterschiedlichen Seite erstellen, sind Sie versucht, die gleiche Kombination zu nutzen, das sich immerhin schon einmal bewährt hat. Dann erinnern Sie sich aber an den Rat von Experten, für jeden Zweck ein anderes Passwort zu verwenden. Wie wäre es also mit einer Liste in der Nähe des Computers, auf der man die einzelnen Zugänge notiert? Auch davor wird gewarnt. Außerdem sollte man – um langfristig geschützt zu sein – die Kennwörter regelmäßig ändern.

Die meisten Personen nehmen diese Faustregeln hin, ohne sie zu hinterfragen. Kein Wunder, denn es braucht mehr als nur ein wenig gesunden Menschenverstand, um sie wirklich zu durchdringen. Zum Beispiel haben fast alle Anbieter einen guten Grund, Passwörter mit mehr als sechs Zeichen zu fordern, die nicht nur aus Kleinbuchstaben bestehen – auch wenn es für uns lästig ist.

Ein Kennwort entspricht einer bestimmten Wahl aus dem dazugehörigen Raum aller möglichen Zeichenfolgen. Sechsstellige Kombinationen aus Kleinbuchstaben, wie »afzjxd«, »dackel«, »geheim« oder »wwwwww«, spannen zum Beispiel einen Raum der Größe $26^6 = 308\,915\,776$ auf, denn für jeden der sechs Buchstaben gibt es 26 unabhängige Auswahlmöglichkeiten.

Quer durchprobiert

Damit ein Passwort der Länge N sicher ist, sollte man es zufällig aus einer Sammlung von A Symbolen wählen. Je nachdem, wie groß N und A sind, variiert die Größe des Raums aller möglichen Zeichenkombinationen $T = A^N$ beträchtlich.

In der folgenden Liste sind fünf Beispiele für verschiedene Werte von A und N angegeben. Die Größe D gibt dabei die Anzahl der Stunden an, die ein leistungsfähiger Computer braucht, um sämtliche Möglichkeiten durchzugehen (wenn man davon ausgeht, dass er eine Milliarde Kombinationen pro Sekunde untersucht). X entspricht den Jahren, die es gemäß dem mooreschen Gesetz (alle zwei Jahre verdoppelt sich die Rechenleistung) dauern würde, um die Kombinationsmöglichkeiten in weniger als einer Stunde zu erfassen.

$$T = A^N, D = T / (10^9 \cdot 3600), \\ X = 2 \log_2 [T / (10^9 \cdot 3600)]$$

$$A = 100, N = 10 \\ T = 10^{20} \\ D = 27777777 \text{ Rechenzeit} \\ X = 49 \text{ Wartezeit in Jahren}$$

$$A = 26, N = 6 \\ T = 308915776 \\ D = 0,0000858 \text{ Rechenzeit} \\ X = 0 \text{ Wartezeit in Jahren}$$

$$A = 100, N = 15 \\ T = 10^{30} \\ D = 2,7 \cdot 10^{17} \text{ Rechenzeit} \\ X = 115 \text{ Wartezeit in Jahren}$$

$$A = 26, N = 12 \\ T = 9,5 \cdot 10^{16} \\ D = 26508 \text{ Rechenzeit} \\ X = 29 \text{ Wartezeit in Jahren}$$

$$A = 200, N = 20 \\ T = 1,05 \cdot 10^{46} \\ D = 2,7 \cdot 10^{33} \text{ Rechenzeit} \\ X = 222 \text{ Wartezeit in Jahren}$$



Viele Menschen halten ihre
Passwörter für sicher. Doch
das ist häufig nicht der Fall.

Wenn man die Länge der Zeichenfolge verdoppelt und zusätzlich Großbuchstaben sowie je zehn Ziffern und Symbole (zum Beispiel & ! ? ä ü ö / + =) zulässt, dann gibt es für jedes Zeichen plötzlich 72 verschiedene Möglichkeiten. Der dazugehörige Raum enthält also 72^{12} Kombinationen, was $19\,408\,409\,961\,765\,342\,806\,016 \approx 19 \times 10^{21}$ ergibt.

Der zweite Raum ist mehr als 62 000 Milliarden Mal so groß wie der erste. Bräuchte ein Computer eine Sekunde, um alle Passwörter aus sechs Kleinbuchstaben zu erzeugen, würde es im zweiten Fall zwei Millionen Jahre dauern. Ein solches Kennwort könnte man dank der zusätzlichen Möglichkeiten nicht mehr durch einfaches Probieren knacken (siehe »Quer durchprobiert«, links).

Um abzuschätzen, wie sicher ein Passwort ist, nutzen IT-Spezialisten häufig eine binäre Darstellung. Anstatt die Anzahl aller Kombinationsmöglichkeiten in den uns geläufigen Dezimalzahlen anzugeben, wählen sie die Zahl zwei als Basis und zählen die Binärziffern. Zum Beispiel ist 42 in binärer Schreibweise 101010 ($= 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0$) und besteht aus sechs Ziffern. Die »binäre Länge« einer Dezimalzahl N lässt sich mit der Formel $1 + \text{ganzzahliger Anteil von } \log_2(N)$ berechnen. Die binäre Darstellung aller sechsstelligen Kennwörter aus Kleinbuchstaben hat demnach eine Länge von 29, für zwölfstellige Folgen aus 72 Symbolen ergibt sich 75. Informatiker sprechen von Passwörtern mit einer 29-Bit- beziehungsweise 75-Bit-Entropie.

Nicht nur die Länge ist entscheidend

Einige Behörden, wie das deutsche BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) oder das französische Anssi (Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information), beraten in digitalen Sicherheitsfragen. Das BSI empfiehlt beispielsweise, mindestens achtstellige Passwörter zu verwenden und dabei sowohl Groß- und Kleinbuchstaben, Zahlen und Sonderzeichen zu verwenden.

Hashfunktionen gegen Hackerangriffe

Eine Hashfunktion wandelt eine Computerdatei D in eine Zeichenfolge fester Länge um, den so genannten Fingerabdruck oder Hash $h(D)$. Zum Beispiel überführt die Funktion »SHA256« den Satz »Guten Tag« zu: 6b973d266dfceb93f1b-b5a687231cd027c27e5099a799b4a3e666a4a-e6773b04. Die Hashfolge besteht aus 64 Hexadezimalzeichen und hat daher eine Entropie von 256 Bit.

Ändert man ein einzelnes Symbol der Ausgangsfolge, sieht der dazugehörige Fingerabdruck völlig anders aus. Für »guten Tag« liefert SHA256 beispielsweise: 08cb7a81c5c75c7c65c13e-6ac58950d4f76ea235aab79fc9080ed4b-c877a2627.

Inzwischen gibt es mehrere Generationen von Hashfunktionen. Die aus den 1990er Jahren stammenden Klassen SHA0 und SHA1 sind veraltet und sollten nicht mehr genutzt werden. SHA2, zu der SHA256 gehört, gilt dagegen als sicher.

Anstatt sich die Passwörter ihrer Kunden zu merken, speichern Webanbieter die dazugehörigen Hashs. Denn diese ähneln den Ergebnissen, die man erhalten würde, wenn man solche Zeichenfolgen nach dem Zufallsprinzip wählen würde. Deshalb ist es nicht möglich, die zu Grunde liegende Datei D eines 256-Bit-Hashs in angemessener Zeit zu berechnen. Selbst wenn ein Hacker also die Daten eines Servers stiehlt, kann er nichts damit anfangen.

den, was einer 49-Bit-Entropie entspricht. Bei besonders sensiblen Informationen sollte man dem BSI zufolge wenigstens eine 100-Bit-Folge wählen. Das Anssi ordnet Passwörter dagegen in drei Klassen: sehr schwache mit weniger als 64 Bit, schwache zwischen 64 und 80 Bit sowie mittelmäßig sichere zwischen 80 und 100 Bit. Möchte man ein Kennwort über mehrere Jahre nutzen, rät das Anssi zu einer Entropie von mindestens 125 Bit.

Der Unterschied zwischen aktueller und langfristiger Sicherheit ergibt sich aus einer Beobachtung, die der US-amerikanische Physiker Gordon Moore in den 1960er Jahren machte: Etwa alle zwei Jahre verdoppelt sich die Rechenleistung von Computern einer bestimmten Preisklasse. Selbst wenn die Technik in letzter Zeit mit dem so genannten mooreschen Gesetz nicht mehr Schritt halten

kann, ist es dennoch sinnvoll, es bezüglich der IT-Sicherheit zu berücksichtigen. Ein wirklich starkes Passwort mit einer Entropie von 138 Bit bestünde etwa aus 18 Zeichen, die man aus einem Satz von 200 Symbolen wählt. Eine solche Folge kann man sich jedoch kaum merken. Deshalb begnügen sich die meisten Systeme mit schwachen oder mittelmäßig sicheren Kennwörtern.

Wenn man die Entropie eines Passworts berechnet, setzt man allerdings voraus, dass der Benutzer es zufällig aus dem Raum der möglichen Zeichenfolgen gewählt hat. In den allermeisten Fällen ist das aber nicht so. Menschen ziehen im Allgemeinen ein gängiges Wort wie »lokomotive« einer willkürlichen Buchstabenfolge vor.

Das führt zu großen Sicherheitslücken. Denn Angreifer können Wörterbücher nutzen, um ein Konto schneller zu

Regenbogentabellen

Versetzen Sie sich in die Rolle eines Hackers, der gestohlene Daten vom Typ [Benutzername, $h(\text{Passwort})$] nutzen möchte, wobei der Hash $h(\text{Passwort})$ durch eine SHA256-Funktion verschlüsselt ist. Wenn das Kennwort zwölfstellig ist und aus Kleinbuchstaben besteht, was einer Entropie von 56 Bit entspricht, existieren insgesamt $26^{12} = 9,54 \times 10^{16}$ verschiedene Kombinationsmöglichkeiten. Es gibt zwei naheliegende Wege, um diese Daten zu entschlüsseln:

Methode 1: Sie generieren alle möglichen Passwörter P und berechnen daraus den Fingerabdruck $h(P)$, den Sie mit der gestohlenen Liste vergleichen. Dafür benötigen Sie nicht viel Speicherplatz, denn nach jedem Versuch löschen Sie die vorherigen Ergebnisse.

Das wird aber extrem lange dauern, bis Sie alle Passwortkombinationen durchprobiert haben. Wenn Ihr Computer eine Milliarde Versuche pro Sekunde durchführt, rechnet er immer noch $26^{12} / (10^9 \times 3600 \times 24) = 1104$ Tage, was etwa drei Jahren entspricht. Das ist nicht unmöglich – ein Netzwerk aus 1000 Computern kann die Aufgabe in zirka einem Tag erledigen. Allerdings müssen Sie das gesamte Prozedere jedes Mal wiederholen, sobald Sie auf neue Datensätze dieser Art stoßen.

Methode 2: Sie berechnen im Voraus die Fingerabdrücke aller möglichen Zeichenkombinationen und speichern sie in einer riesigen Tabelle. Das ist zwar aufwändig, doch Sie müssen das nur einmal machen. Für jeden neuen Datensatz, den Sie erhalten, brauchen Sie nur noch in dieser Liste nachzuschlagen.

Dafür benötigt man allerdings einen Speicher von $(9,54 \times 10^{16}) \times (12 + 32)$ Bytes (zwölf für das Passwort und 32 für den dazugehörigen Fingerabdruck). Das ergibt $4,2 \times 10^{18}$ Bytes, was mehr als vier Millionen Festplatten mit einer Kapazität von einem Terabyte entspricht.

Der Ansatz ist daher ebenso schwer realisierbar wie der erste; beide Fälle führen in eine Sackgasse. Deshalb suchen Informatiker nach einem Mittelweg, mit etwas mehr benötigtem Speicherplatz als in Methode 1, aber dafür weniger Rechenaufwand.

1980 formulierte der US-amerikanische Informatiker Martin Hellman einen solchen Ansatz, den Philippe Oechslin von der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne 23 Jahre später erstmals verwirklichte. Die Idee besteht darin, alle möglichen Zeichenkombinationen zu gruppieren und nur einen Vertreter aus jeder Gruppe zu speichern, was erheblich weniger Speicherplatz erfordert als Methode 2. Wenn man anschließend das Kennwort zu einem Hash herausfinden möchte, muss man statt aller Möglichkeiten bloß in der entsprechenden Gruppe suchen, was deutlich schneller geht als Methode 1.

Im Detail funktioniert das Ganze so: Man konstruiert eine Konvertierungsfunktion C , die aus dem Fingerabdruck $h(P)$ eines Kennworts P eine neue Zeichenfolge $C(h(P))$ erzeugt. Weil sich die Länge und die zulässigen Symbole des Fingerabdrucks von denen eines Passworts unterscheiden, überführt C einen Fingerabdruck in die Form eines möglichen Kennworts.

Ein Mittelweg als Lösung

Dann beginnt die Vorarbeit, ähnlich wie bei Methode 2. Man startet mit einer beliebigen Zeichenfolge P_0 , die einem Kennwort entsprechen könnte. Daraus berechnet man den dazugehörigen Fingerabdruck $h(P_0)$ und erzeugt ein neues Kennwort $P_1 = C(h(P_0))$. Da P_1 und P_0 über die Funktion C miteinander verbunden sind, gehören sie der gleichen Gruppe an. Den Prozess wiederholt man n -mal, wobei n eine große Zahl ist. In einer so genannten Regenbogentabelle speichert man dann bloß die beiden Werte P_0 (den Startwert) und $h(P_n)$ (den Hash des Endwerts) als Vertreter der Gruppe.

knacken. Inzwischen gibt es etliche Listen, in denen beliebte Passwörter ihrer Häufigkeit nach geordnet sind. Ein Hacker wird versuchen, an eine solche Liste heranzukommen und die Wörter der Reihe nach durchzugehen. Erschreckenderweise funktioniert das extrem gut. Ohne äußeren Zwang ist man versucht, einfache Wörter, Nachnamen, Vornamen oder kurze Sätze in seine Passwörter einzubauen. Im Gegensatz zu einer völlig zufälligen Wahl ist die Anzahl dieser Kombinationsmöglichkeiten relativ gering. Die Entropie eines Kennworts verkleinert sich dadurch erheblich, so dass ein Hacker durchschnittlich deutlich weniger Versuche braucht.

Der Softwarehersteller für Kennwortverwaltung »SplashData« hat eine Datenbank mit über 5 Millionen Einträgen ausgewertet, die in den letzten Jahren gehackt

Danach wiederholt man den Vorgang mit anderen Zeichenfolgen, bis man alle zwölfstelligen Kombinationen gruppiert hat. Dadurch erhält man eine Liste, die sich aus dem jeweiligen Startwert und dem Fingerabdruck des Endwerts der jeweiligen Gruppe zusammensetzt. Das dauert zwar recht lange, ist aber mit einem Netzwerk aus Computern bewältigbar. Man benötigt etwa eine Million mal weniger Speicherplatz als bei Methode 2, so dass vier Ein-Terabyte-Festplatten dafür ausreichen.

Mit einer solchen Regenbogentabelle lässt sich jedes Kennwort innerhalb von bloß wenigen Sekunden knacken. Stellen Sie sich vor, Sie haben den Hash $h(Q) = f_0$ und möchten das dazugehörige Passwort Q ermitteln. Dann müssen Sie zuerst herausfinden, zu welcher Gruppe Q gehört. Dazu wandeln Sie den Fingerabdruck in eine Zeichenfolge $C(f_0)$ um und berechnen daraus einen neuen Hash $h(C(f_0)) = f_1$. Von diesem neuen Abdruck ausgehend erzeugen Sie f_2 und so weiter, bis einer der Abdrücke f_m mit einem Wert $h(P_n)$ in der Regenbogentabelle übereinstimmt.

So wissen Sie, dass Q zur Gruppe $[P_0, h(P_0)]$ gehört. Indem Sie also die Hashes $h_i = h(P_i)$ zu allen in dieser Gruppe befindlichen Passwörter P_i berechnen, müssen Sie zwangsläufig auf f_0 stoßen. Sie bestimmen demnach $h_0 = h(P_0)$, danach $h_1 = h(P_1) = h(C(h(P_0)))$ und vergleichen die Ergebnisse jeweils mit f_0 . Hat man schließlich das gesuchte $h_k = f_0$ gefunden, lautet das dazugehörige Kennwort $Q = C(h_{k-1})$. Anstatt die Hashfunktionen aller Kombinationen zu bilden, durchsucht man nur eine bestimmte Gruppe der Größe n .

Die anfallende Rechenzeit entspricht dann bloß der Zeit, f_m in der Tabelle zu finden und h_1, h_2, \dots, h_k zu berechnen. Das geht etwa eine Million mal schneller vorstatten, als man zum Erstellen der Regenbogentabelle braucht. Dadurch lässt sich in angemessener Zeit jedes Passwort knacken.

wurden, und die 25 verbreitetsten Kennwörter aus dem Jahr 2019 veröffentlicht: 1. 123456; 2. 123456789; 3. qwerty; 4. password; 5. 1234567; 6. 12345678; 7. 12345; 8. iloveyou; 9. 111111; 10. 123123; 11. abc123; 12. qwerty123; 13. 1q2w3e4r; 14. admin; 15. qwertyuiop; 16. 654321; 17. 555555; 18. lovely; 19. 7777777; 20. welcome; 21. 888888; 22. princess; 23. dragon; 24. password1; 25. 123qwe.

Bei vierstelligen Ziffernfolgen (etwa dem PIN-Code einer SIM-Karte) sind die Ergebnisse noch erschreckender. 2013 wertete die IT-Beratungsfirma DataGenetics eine Sammlung von 3,4 Millionen gestohlenen Zahlencodes aus. Die am meisten verwendete Folge machte mit elf Prozent der Auswahl 1234 aus, dicht gefolgt von 1111 und 0000 mit einer Häufigkeit von sechs beziehungsweise zwei Prozent.

Erstaunlicherweise tauchte die Zahl 8068 bloß 25 mal unter den 3,4 Millionen Einträgen auf – viel seltener als die erwarteten 340 Verwendungen, wenn jede Kombination gleich oft erscheinen würde. Doch bevor Sie Ihre PIN entsprechend ändern, sollte Sie bedenken, dass sich die Verteilung nach der Veröffentlichung höchstwahrscheinlich geändert hat.

Selbst wenn ein Angreifer keinen Zugang zu einer Passwortliste hat, kann er auf andere Tricks zurückgreifen, um Benutzerkonten zu knacken. Zum Beispiel kann er berücksichtigen, wie häufig gewisse Buchstaben in einer Sprache auftreten und seine Versuche demnach ordnen. Einige Hacker beachten sogar, dass viele Zeichenkombinationen einer bestimmten Struktur folgen, wie $A1=B2=C3$, $AwX2A-wX2$ oder $00o.li$ – alles Beispiele für Passwörter, die ich selbst lange Zeit benutzt habe. Zudem verbinden die meisten Menschen mehrere verbreitete Folgen miteinander, wie password123 oder johnABC0000. Durch solche Muster können Angreifer eine Reihenfolge festlegen, wodurch sich ihre Suche beschleunigt.

Wie kann man die Sicherheit der eigenen Kennwörter testen?

Das alles sind gute Gründe, um ein Passwort zufällig zu wählen. Dafür gibt es Software, so genannte Kennwortverwalter. Allerdings könnten solche Programme (mit oder ohne Absicht) einen schlechten Zufallsgenerator verwenden. In diesem Fall sind auch deren Vorschläge nicht perfekt – in der Regel aber immer noch besser als selbst gewählte (siehe »Spektrum« März 2018, S. 72).

Ordnungsgemäß gestaltete Webseiten prüfen Kennwörter auf all diese Kriterien hin, wenn man ein Konto bei ihnen erstellt, und lehnen dann diejenigen ab, die nicht sicher genug sind. Das mag vielleicht lästig sein – doch es ist zu Ihrem eigenen Wohl.

Es gibt sogar eine Möglichkeit, mit der Sie testen können, ob Ihre Zugangsdaten schon einmal gehackt wurden. Die Webseite haveibeenpwned.com/Passwords durchsucht eine Liste mit mehr als 500 Millionen gestohlenen Kennwörtern. Als ich mein Standardpasswort $e=mc2e=mc2$ eingab, das mir gut gefiel und ich für sicher hielt, erhielt ich prompt die verunsichernde Antwort: »This password has been seen 110 times before«. Weitere Versuche zeigten, dass es schwierig ist, ein eingängiges Wort vorzuschlagen, das die Basis noch nicht kennt. Zum Beispiel tauchen aaaaaaaaaa

12.722 mal; a1b2c3d4 117.106 mal; abcdcba 389 mal; abczyx 198 mal; acegi 118 mal; merkel 1188 mal; trump 880 mal; thunberg 42 mal und macron 309 mal auf.

Manchmal hat man auch Erfolg. Hier sind zwei Beispiele für Passwörter, welche die Webseite noch nicht in ihrer Liste hatte: spektrumderwissenschaft und lewwerworscht. Doch jetzt, da man sie ausprobiert hat, könnte die Datenbank sie bei der nächsten Aktualisierung ihrer Liste hinzufügen. Jedenfalls sollte man davon absehen, diese Buchstabenfolgen künftig in seinen Zugangsdaten zu verwenden.

Glücklicherweise treffen Anbieter Vorkehrungen, um ihre Nutzer zu schützen. Die einfachste Methode findet sich bei Bankkarten: Nach drei Fehlversuchen werden sie gesperrt. Daran angelehnt verdoppeln einige Webseiten nach jeder falschen Eingabe die Wartezeit zwischen den Login-Versuchen. Damit wollen sie verhindern, dass ein Angreifer nach und nach alle Passwortmöglichkeiten durchgeht.

Das US-amerikanische NIST (National Institute of Standards and Technology) hat 2018 eine Mitteilung veröffentlicht, in der es Webanbietern empfiehlt, Passwort-Datenbanken zu durchsuchen, bevor sie das Kennwort eines neuen Nutzers bei der Registrierung zulassen. Viel wichtiger als die Wahl der Zugangsdaten ist jedoch, wie ein Webserver die geheimen Zeichenfolgen aufbewahrt.

Eine Liste mit Benutzernamen und den dazugehörigen Passwörtern sollte beispielsweise niemals im Klartext auf dem Computer gespeichert sein, über den die Webseite läuft. Ein Hacker könnte sie sich sonst beschaffen, entweder weil die Seite schlecht geschützt ist oder indem er einen bisher unbekanntem Fehler im System ausnutzt.

Eine Art Fingerabdruck hilft, Passwörter zu schützen

Um das zu verhindern, kann man die Passwörter in der Liste verschlüsseln. Ein Algorithmus wandelt sie dann in einen Geheimcode aus scheinbar zufälligen Zeichen um. Das funktioniert zwar, hat aber Nachteile. Bei jeder Anmeldung muss der Anbieter das Kennwort in der Liste entziffern, um es mit dem Nutzernamen zu vergleichen, was recht aufwändig ist. Zudem befindet sich der Entschlüsselungsalgorithmus dann ebenfalls auf dem Server der Webseite, auf den ein Hacker zugreifen könnte.

Eine Lösung bietet eine bestimmte Variante der Verschlüsselung, so genannte Hashfunktionen, die eine Art Fingerabdruck eines Passworts erzeugen (siehe »Hashfunktionen gegen Hackerangriffe«, S. 73). Sie weisen einer Datei D einen Ausdruck $h(D)$ mit einer festen Länge zu, der D eindeutig charakterisiert. Das Wichtigste dabei: Die Hashfunktion ist wie eine Einbahnstraße. Man kann zwar einfach von D auf $h(D)$ schließen; andersherum lässt sich D aber kaum aus $h(D)$ ermitteln.

Wegen der begrenzten Länge des Hashes $h(D)$ ist es durchaus möglich, dass zwei unterschiedliche Dateien D und D' denselben Fingerabdruck erhalten, was Informatiker als Kollision bezeichnen. Doch in der Praxis lässt sich nicht herausfinden, ob für ein gegebenes D ein D' mit gleichem Fingerabdruck existiert.

Dank solcher Hashfunktionen können Anbieter die Zugangsdaten ihrer Kunden sicher auf einem Server speichern, indem sie eine Liste mit dem Benutzernamen und dem Fingerabdruck $h(\text{Passwort})$ anlegen. Wenn sich ein Benutzer anmeldet, liest der Server das Kennwort aus, berechnet daraus den Hash und prüft, ob Name und Fingerabdruck als Paar in der Liste auftauchen.

Selbst wenn es einem Hacker gelingt, auf den Server zuzugreifen, kann er vom gespeicherten Hash nicht auf das Passwort schließen. Genauso wenig lässt sich ein anderes Kennwort erzeugen, das denselben Fingerabdruck hat und die Webseite täuschen würde. Diese Vorsichtsmaßnahmen sind extrem wichtig, denn sogar große Webseiten, die sich aufwändig gegen Angriffe schützen, wurden schon gehackt. Im Jahr 2016 wurden zum Beispiel die Benutzerdaten der Yahoo!-Gruppe entwendet.

Um es einem Angreifer noch schwerer zu machen, eine gestohlene Liste zu verwenden, versehen einige Anbieter die Passwörter zusätzlich mit so genanntem Salt (aus dem Englischen für Salz). Dabei fügen sie jedem Kennwort eine individuelle zufällige Zeichenfolge hinzu und erzeugen erst danach einen Hash. In diesem Fall unterscheiden sich die Fingerabdrücke selbst dann noch, falls zwei Benutzer dasselbe Passwort verwenden.

Die Liste auf dem Server eines Anbieters enthält dann drei Elemente: den Benutzernamen, den Hash $h(\text{Passwort} + \text{Salt})$ und das Salt. Wenn der Server ein eingegebenes Kennwort überprüft, fügt er das zum Nutzernamen gehörende Salt hinzu, berechnet daraus den Fingerabdruck und gleicht ihn mit der Datenbank ab.

Diese Methode erschwert die Arbeit eines Hackers selbst für schwache Kennwörter erheblich. Ohne Salt könnte er eine Passwort-Datenbank (ein »Wörterbuch«) nehmen, alle Fingerabdrücke davon berechnen und seine Ergebnisse mit der gestohlenen Liste vergleichen. Dadurch würde er jene Zugangsdaten aufdecken, die Zeichenfolgen aus dem Wörterbuch nutzen. Durch das Salt muss der Angreifer aber für jeden einzelnen Nutzernamen alle Inhalte der Datenbank durchgehen, indem er ihnen das dazugehörige Salt hinzufügt. Bei 1000 Konten erhöht sich die Anzahl der Berechnungen damit um den Faktor tausend.

Um auf dem neuesten Sicherheitsstand zu bleiben, suchen Informatiker ständig nach innovativen Methoden (siehe »Regenbogentabellen«, S. 74), die Angreifer nutzen könnten, um Passwörter zu knacken. Im Zeitalter des Internets und der Supercomputer hat sich die Wissenschaft sicherer Passwörter dadurch zu einem gnadenlosen Kampf gegen die Zeit entwickelt. ◀

QUELLEN

Avoine, G. et al.: How to handle rainbow tables with external memory. In: Pieprzyk, J., Suriadi, S. (Hg.): Information security and privacy – ACISP 2017. Springer, 2017

Grassi, et al.: Characterization and improvement of time-memory trade-off based on perfect tables. ACM Transactions on Information and System Security 11, 2008

Hellman, M. E.: A cryptanalytic time-memory trade-off. IEEE Transactions on Information Theory IT-26, 1980



Bei welchem Händler finde ich meine Lieblingszeitschrift?



1. Zu mykiosk.com gehen
2. Ort eingeben
3. Zeitschrift eingeben
4. Händler finden



mykiosk.com

DER SCHNELLSTE WEG ZU UNSEREN ZEITSCHRIFTEN



AUF EINEN BLICK GENIALE ERFINDER?

- 1** Neandertaler haben vor rund 200 000 Jahren ein Rezept zur Herstellung eines Kunststoffes entwickelt: das aus Rinde erzeugte Birkenpech.
- 2** Unter Archäologen gilt dies als Hinweis auf die fortgeschrittenen kognitiven und planerischen Fähigkeiten des Neandertalers. Denn bislang ging man davon aus, dass der Stoff nur durch komplexe Verfahren gewonnen werden kann.
- 3** Doch neue experimentelle Forschungen haben gezeigt, dass Birkenpech auch ein einfaches Zufallsprodukt gewesen sein könnte.



MENSCHWERDUNG DER KUNSTSTOFF DER NEANDERTALER

Lange waren Anthropologen davon überzeugt: Der Neandertaler war dem *Homo sapiens* kulturell und kognitiv unterlegen. Inzwischen hat sich das Bild gewandelt. Funde von Brocken aus Birkenpech legen sogar nahe, dass er über sehr fortschrittliche technische Kenntnisse verfügte. Forscher haben die These geprüft – und die Fähigkeiten des Neandertalers in ein neues Licht gerückt.



Der Archäologe **Patrick Schmidt** ist Privatdozent für naturwissenschaftliche Archäologie und Mineralogie an der Eberhard Karls Universität Tübingen.



» spektrum.de/artikel/1736702



Das rund drei Zentimeter große Stück Birkenpech, das ganz links in drei Ansichten wiedergegeben ist, stammt aus Königsau (Sachsen-Anhalt). Es lag in den 40 000 bis 84 000 Jahre alten Schichten eines Lagerplatzes der Neandertaler. Rechts davon, ebenfalls von drei Seiten aufgenommen, ein 2016 an der niederländischen Küste entdecktes Steingerät, das in einem Griff aus Birkenpech (Pfeil) steckt. Das Alter: zirka 50 000 Jahre.

► Bald nachdem die ersten Fossilien 1856 bei Mettmann ans Licht gekommen waren, stand für viele Gelehrte fest: Der Neandertaler war das lange gesuchte Bindeglied zwischen Affen und Menschen. Ohne Zweifel musste das robuste Skelett zu einer primitiven Vorstufe des modernen Menschen gehören. Das schien aus damaliger Sicht nicht abwegig zu sein. Schließlich habe der anatomisch moderne Mensch, *Homo sapiens*, den Neandertaler letztlich verdrängt, ihn vielleicht sogar ausgerottet. Denn dank seiner höheren Intelligenz sowie seiner größeren Leistungs- und Anpassungsfähigkeit muss *Homo sapiens* ihm überlegen gewesen sein. Jedenfalls entsprach diese Erklärung dem Zeitgeist des ausgehenden 19. Jahrhunderts.

Seitdem ist in der Steinzeitarchäologie viel passiert. In den darauf folgenden Jahrzehnten haben Forscher herausgefunden, dass die Neandertaler schon früh ganz Europa und Teile Vorderasiens besiedelt hatten. Fast 250 000 Jahre lang trotzten sie erfolgreich den harschen Lebensbedingungen der Eiszeiten. Gesichert ist auch, dass die Frühmenschen spezialisierte Geräte aus Feuerstein herstellten – nach einer Methode, die große Planungstiefe vermuten lässt: dem so genannten Levallois-Konzept. Dabei wurde ein Stein zunächst durch mehrere Schläge in Form gebracht, um daraus dann mit einem gezielten Hieb große Abschläge herauszutrennen. Die Neandertaler, so wie schon ihre Vorfahren der Spezies *Homo heidelbergensis*, nutzten überdies Jagdwaffen aus Holz – das belegen die 300 000 Jahre alten Holzspeere aus Schöningen und die 115 000 Jahre alte »Lanze« von Lehringen in Niedersachsen. Und wahrscheinlich waren die Eiszeitmenschen in der Lage, Werkzeuge aus Einzelteilen zusammensetzen, indem sie Steinspitzen an Holzschäfte befestigten.

Mittlerweile befassen sich Anthropologen und Archäologen auch mit den kognitiven Fähigkeiten der Neandertaler. Die große Frage lautet: Waren die Neandertaler in der Lage, symbolisch zu denken und zu handeln, ihre Gedankenwelt etwa durch Zeichen zum Ausdruck bringen? Von vielen Fundplätzen der Altsteinzeit ist bekannt, dass die Neandertaler Pigmente wie Ocker oder Manganoxid kannten sowie

sich mit Tierzähnen, Muscheln und vielleicht Federn schmückten. Manchen Forschern zufolge stellten sie auch Kleidung her und kochten Nahrung. Ebenso gibt es Hinweise darauf, dass sie ihre Toten beerdigten.

Kaum ein Experte vertritt heute noch die These, der anatomisch moderne Mensch wäre am Aussterben des Neandertalers beteiligt gewesen. Vielmehr dürften klimatische Veränderungen der Grund dafür gewesen sein. In der Archäologie gilt der Neandertaler quasi als rehabilitiert. Für primitiv oder simpel halten ihn nur noch die allerwenigsten.

Das Pech der Neandertaler

Doch wie weit reichend waren seine kognitiven Fähigkeiten? Einige Archäologen versuchen diese Frage durch den Vergleich mit dem frühen anatomisch modernen Menschen in Afrika zu beantworten. Letzterer nutzte Pigmente, schuf damit irgendwann Kunst, jagte Tiere zu Land wie zu Wasser und entwickelte zum Beispiel spezialisierte Jagdwaffen, Knochenwerkzeuge oder Klebstoffe, mit denen er Werkzeuge zusammensetzte. Vor allem die Kleber sind für Steinzeitarchäologen von Interesse, weil ihre Erfindung und Weiterentwicklung noch immer Rätsel aufgeben. In Afrika sind einige Fundstellen bekannt, an denen Rückstände von Pech zu Tage kamen. Nichts davon ist älter als 100 000 Jahre. Die Neandertaler hingegen produzierten in Europa schon vor 200 000 Jahren Pech aus Birkenrinde. Unter Einfluss von Hitze wandelten sie die weiße Borke in einen schwarzen teer- oder pechartigen Stoff um (siehe »Was ist Pech, was ist Teer?«, links unten). Eine technische Revolution, die der Frühmensch offenbar entwickelt hatte, um das Birkenpech als Kleber zu verwenden – so lautet die gängige Erklärung. Für viele Forscherkollegen ist damit klar: Die Neandertaler verfügten nicht nur vergleichsweise früh über das Wissen um die Herstellung von Pech, sondern auch über die nötigen kognitiven Fähigkeiten, ein Verfahren dafür zu entwickeln. Für viele Archäologen ist das steinzeitliche Birkenpech damit von größter Bedeutung für das Verständnis der Neandertaler, ihrer Fähigkeiten und ihrer Lebensweise.

Leider sind jedoch bislang nur sehr wenige Reste von Birkenpech bekannt, die sicher aus der Hand eines Neandertalers kommen:

- Das älteste Stück, ein etwa vier Zentimeter großer Klumpen, stammt von der italienischen Fundstelle Campitello in der Toskana. Es ist zirka 200 000 Jahre alt. Im Pech steckt ein Steinwerkzeug mit scharfen Kanten. Offensichtlich diente die schwarze Masse als Griff. In Campitello kam noch ein zweites Steinwerkzeug ans Licht, an dem aber nur noch Reste von Birkenpech haften.
- Zwei weitere Fragmente haben Archäologen in Königsau bei Magdeburg geborgen. Sie entdeckten die Birkenpechstücke in rund 40 000 bis 84 000 Jahre alten Ablagerungen. Die beiden Klumpen sind ungefähr zwei beziehungsweise drei Zentimeter groß. In den Stücken klebten keine Steingeräte mehr; dafür zeugen Abdrücke im Pech davon, dass auch jene Teermassen einst um Schneidwerkzeuge modelliert wurden. Sehr wahrscheinlich bildete das Pech hier ebenfalls einen Griff.
- Erst 2016 wurde ein weiteres Stück Birkenpech in Zandmotor entdeckt, einer ungefähr 50 000 Jahre alten Fundstel-

Was ist Pech, was ist Teer?

Wenn Nadelholz oder Birkenrinde mittels der so genannten Doppeltopfmethode destilliert wird, entsteht zunächst ein als Kleber eher unbrauchbares Material: das flüssige Pech. Erst wenn man das einkocht, wird daraus eine zähe Masse – Teer. Für das Birkenpech der Altsteinzeit ist diese Unterscheidung allerdings nicht nützlich. Denn die Definition beruht auf dem genannten Herstellungsverfahren – und nicht auf der Zusammensetzung der schwarzen Substanz. Solange also unbekannt ist, wie das altsteinzeitliche Birkenpech gefertigt wurde, lässt sich nicht klären, ob es sich um Teer oder Pech handelt.



Lange galt, dass sich Birkenpech nur in einem Verfahren unter Luftausschluss herstellen lässt. Experimente an der Universität Tübingen haben nun gezeigt: Das Pech entsteht auch unter Sauerstoffzufuhr. Die Forscher verbrannten Birkenrinde neben einem überhängenden Stein ①. Das Pech kondensierte an der Steinoberfläche ② und ließ sich anschließend mit einem Steingerät abkratzen ③ und sammeln ④.



le an der niederländischen Küste. Auch dieses drei Zentimeter große Stück haftet an einem Feuersteingerät und diente wohl zur besseren Handhabung.

Dass es sich bei all diesen Funden tatsächlich um Birkenpech handelt, wiesen Forscher mit Hilfe der Gaschromatografie nach, einer Methode der analytischen Chemie. Dabei wird eine winzige Probe in seine chemischen Bestandteile zerlegt, um diese zu identifizieren. Das Ergebnis: Die Fundstücke aus Campitello, Königsau und Zandmotor enthalten alle den Naturstoff Betulin, der in der Rinde von Birken steckt. Er ist charakteristisch für diese Bäume und gilt als zweifelsfreier Nachweis für Birkenpech.

Neben den Klumpen von den genannten drei Fundorten gibt es noch eine Hand voll weiterer Pechfunde, zum Beispiel aus der etwa 120 000 Jahre alten Fundstätte Inden-Altendorf bei Aachen. Da diese Stücke nicht gaschromatografisch untersucht wurden, ist nicht sicher, ob sie wirklich aus Birkenpech bestehen. Denn in der Steinzeit hatte man Klebstoffe auch aus dem Harz von Nadelbäumen gewonnen und natürlich vorkommendes Bitumen verwendet. Laut der gängigen Lehrmeinung sind solche Kleber allerdings archäologisch weniger von Bedeutung als Birkenpech, weil sie viel einfacher hergestellt werden können.



So machten es die alten Römer

Die Erkenntnisse über das Neandertaler-Birkenpech stützen sich also auf sehr wenige Funde. Doch sicher ist: Die Frühmenschen hatten den Stoff über einen Zeitraum von 150 000 Jahren hergestellt und wohl weniger als Kleber, sondern als Griffmasse verwendet, um Steinwerkzeuge besser halten zu können. Was die vereinzelt Pechfunde des Neandertalers jedoch besonders faszinierend macht, ist die Frage nach ihrer Entstehung. Birkenpech ist kein Naturprodukt. Anders als Bitumen lässt es sich nicht aus natürlichen Vorkommen schöpfen, sondern muss – so der bisherige Wissensstand – in einem aufwändigen Prozess aus Birkenrinde destilliert werden. Es existieren aber weder Funde noch Hinweise, um zweifelsfrei zu rekonstruieren, wie die Menschen der Altsteinzeit das Pech gewonnen haben. Die ältesten bekannten Nachrichten über eine Herstellungsmethode stammen aus einer sehr viel späteren Epoche – der römischen Antike.

Aus den Schriften des antiken Universalhistorikers Plinius des Älteren lässt sich ableiten, dass die Römer Pech vor allem aus Nadelhölzern mittels der so genannten Doppeltopfmethode produziert haben. Auf dieselbe Weise stellten sie vermutlich auch Birkenpech her, das ergaben jüngst Untersuchungen von Martine Regert und Maxime Rageot an der Université Côte d'Azur in Nizza. Wie funktio-



niert dieses Verfahren? Holz oder Rinde wird in einem Behälter aus Ton erhitzt, um das Harz in Form eines sich bildenden Flüssigkeitsgemischs zu entziehen. Das Gemisch lässt man in einen zweiten Behälter abtropfen. Sobald die Flüssigkeit abkühlt, wandelt sie sich in einen dünnflüssigen Teer um. Dann muss der Teer zu dickflüssigem Pech eingekocht werden. Auch später, im Mittelalter, erzeugten Handwerker auf ganz ähnliche Weise Pech aus Nadelhölzern und Birkenrinde. Dieser thermische Umwandlungsprozess – eine so genannte Pyrolyse – ist kein banaler Vorgang: Während die Rinde erhitzt wird, muss die Sauerstoffzufuhr reduziert werden, damit die austretenden Pflanzensäfte vor ihrer Umwandlung nicht verbrennen. Außerdem muss die Temperatur in den Behältern kontrolliert werden. Pech oder Teer herzustellen, ist also ein aufwändiger Prozess, der einiges an Wissen und Planung erfordert.

Es spricht kaum etwas dafür, dass die Neandertaler mit einer ähnlichen Methode wie die Römer vorgegangen wären. Behälter aus Keramik oder Stein existierten in der Altsteinzeit nicht, geschweige denn Gerätschaften, um die Sauerstoffzufuhr zu regulieren. Die genaue Temperaturkontrolle dürfte zudem sehr kompliziert gewesen sein. Daher haben Archäologen seit den 1980er Jahren verschiedene Experimente angestellt, um auszuprobieren, wie sich Pech mit einfachen Mitteln produzieren ließe.

Bei allen diesen Versuchen wurde die Birkenrinde unter Luftausschluss verschwelt. So haben die Forscher die Birkenrinde in eine Erdgrube gelegt und indirekt erhitzt – durch ein darüber brennendes Feuer (siehe »Wie Archäologen die Herstellung von Birkenpech bisher rekonstruierten«, rechts). In einem ähnlichen Versuch hoben Archäologen ein kleines Erdloch aus, in das sie brennende Rindenrollen legten. Oder sie begruben die Rindenrollen unter einem Haufen aus Glut und Asche. Auch deutlich komplexere Methoden wurden getestet: Die Rinde liegt über einem Gefäß im Boden, darüber wird ein Tonkegel geformt und mit brennenden Holzscheiten erhitzt. Im Grunde ähnelt dieses Verfahren bereits der römischen Doppeltopfmethode.

Waren Neandertaler technisch fortgeschrittener als anatomisch moderne Menschen?

Die meisten dieser Experimente waren erfolgreich. Am Ende kam Birkenpech heraus. Einzig dessen Konsistenz unterschied sich je nach Herstellungsmethode. Wurde die Rinde in einer gefäßähnlichen Struktur erhitzt, entstand eher dünnflüssiger Teer. Vergrub man die Birkenrinde, sammelte sich eher dickflüssiges Pech an. Zudem variierte die Menge des produzierten Pechs – grob nach folgender Regel: je komplexer der Versuchsaufbau, desto größer die gewonnene Menge an Birkenpech.

Die beschriebenen Techniken sind allesamt aufwändig, zeitintensiv und müssen gut geplant werden. Damit sind sie wesentlich komplexer als fast alle andere Praktiken der Altsteinzeit. Wir kennen keinen ähnlichen Vorgang, bei dem vor 200 000 Jahren die Temperatur in einer nicht einsehbaren Umgebung kontrolliert werden musste. Das heißt auch, die Neandertaler könnten diese Methode nicht durch Zufall entdeckt, sondern müssten sie gezielt erfunden haben. Die Hypothese, solche aufwändigen Verfahren seien genutzt

worden, eignet sich also nicht unmittelbar dazu, die Entdeckung oder früheste Herstellung von Birkenpech zu erklären. Geht man dennoch davon aus, dass die Frühmenschen das Birkenpech unter Tonkuppeln oder in Erdlöchern destillierten, hat das zwei Konsequenzen – erstens: Die Erzeugung von Birkenpech war einer der aufwändigsten Prozesse der gesamten Altsteinzeit und sicher der komplexeste zur Zeit seine Erfindung vor 200 000 Jahren. Zweitens: Die Neandertaler waren damals schon kognitiv zu einem fortgeschrittenen Verhalten fähig, das jenes des zeitgleich lebenden anatomisch modernen Menschen in Afrika weit übertraf.

Die Faktenlage gibt das allerdings nicht her. Die erstmalige Herstellung von Birkenpech durch Neandertaler ist für Archäologen eine Blackbox. Wir kennen den Ablauf nicht, haben aber das Endprodukt vor uns – aus dem wiederum Rückschlüsse auf den Neandertaler gezogen werden. Als Wissenschaftler befinden wir uns damit in einer ziemlich unangenehmen Situation. Im Jahr 2018 machte sich deshalb eine internationale Forschergruppe, der ich angehöre, unter Leitung der Eberhard Karls Universität Tübingen daran, sich im Rahmen mehrerer Experimente mit diesem Problem zu befassen.

Das Ziel unserer Versuche war es, Birkenpech mit dem geringstmöglichen Aufwand herzustellen. Der Prozess sollte nicht in der Erde, sondern oberirdisch und ständig beobachtbar ablaufen. Wir wollten so herausfinden, ob es eine Technik gibt, die Neandertaler durch Zufall entdeckt haben könnten. Wir gingen also entgegen der Annahme vor, dass Pech nur unter Luftabschluss entstehen kann.

Dass sich der Kunststoff womöglich auch unter Sauerstoffzufuhr bildet, darauf lieferten 2016 Studien einen Hinweis, die in einem anderen Zusammenhang angestellt wurden: Zusammen mit einer Forschergruppe unserer Universität hatte ich untersucht, ob im südlichen Afrika vor ungefähr 100 000 Jahren Steine auf glühenden Kohlen erhitzt wurden, um sie für die Werkzeugherstellung vorzubereiten. Dabei hatte ich beobachtet, dass sich an der Oberfläche der Steine eine Art Holzteer abgelagert hatte.

Das brachte uns auf die Spur. Für unser Experiment sammelten wir Birkenrinde von Totholz. Wir platzierten die Rindenrollchen neben einem Stein mit leicht überhängenden Seiten. Dann zündeten wir die Birkenrinde an. Die weiße Borke brennt sehr gut – selbst im feuchten Zustand. Deshalb nutzten Menschen sie in der Steinzeit eventuell auch als natürlichen Anzünder. Als die Rinde nun brannte, kondensierte ein dünner Film Birkenpech direkt auf dem Stein. Mit einem Steinwerkzeug kratzten wir die schwarze Masse ab. Bei diesem Verfahren handelt es sich ebenfalls um eine Pyrolyse, doch muss hierbei die Temperatur nicht kontrolliert werden.

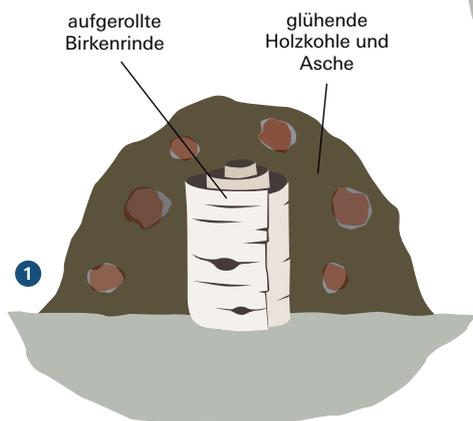
Das gewonnene Pech war klebrig und dickflüssig. Es weist dieselben mechanischen Eigenschaften auf wie eingekochtes Birkenpech, das unter Luftabschluss hergestellt wurde. Die Kondensationsmethode funktioniert jedoch unter steter Luftzufuhr, und der Prozess lässt sich beobachten. Das ist der entscheidende Punkt. Daraus folgt, dass die Neandertaler diese Methode durchaus zufällig entdeckt haben könnten – etwa während sie an der Feuerstelle hockten und ein Stück brennende Birkenrinde an einen Stein legten, eventuell nachdem sie ein Feuer anzündeten. Das Verfahren lässt sich zu-

Wie Archäologen die Herstellung von Birkenpech bisher rekonstruierten

Seit den 1980er Jahren haben Forscher erprobt, wie die Neandertaler an ihr Birkenpech kamen. Alle experimentellen Methoden basieren auf einer Umgebung, in der das Birkenpech unter reduziertem Sauerstoffgehalt verschwelt. Archäologen um Geeske Langejans und Paul Kozowyk von der Universität Leiden haben 2017 beispielsweise diese drei Verfahren getestet.

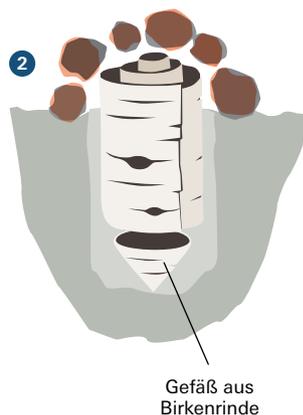
1 Pech aus der Asche

Bei dieser Methode rollten die Forscher ein Stück Birkenrinde auf und fixierten den handgroßen Zylinder mit frischen Holzfasern. Dann häuften sie Glut und Asche darauf, damit keine Luft an die Rinde gelangt. Wie die Experimenteure erklären, mussten sie dabei besonders das Verhältnis von Asche und Glut im Blick behalten. Denn zu viel Hitze verbrennt die Borke; zu viel Asche dagegen senkt die Temperatur, und es entsteht kein Pech. Mit dem Verfahren konnten die niederländischen Wissenschaftler aus 100 Gramm Birkenrinde ein Gramm relativ hartes Pech gewinnen, das sich zwischen den Schichten der Birkenrinde ansammelte.



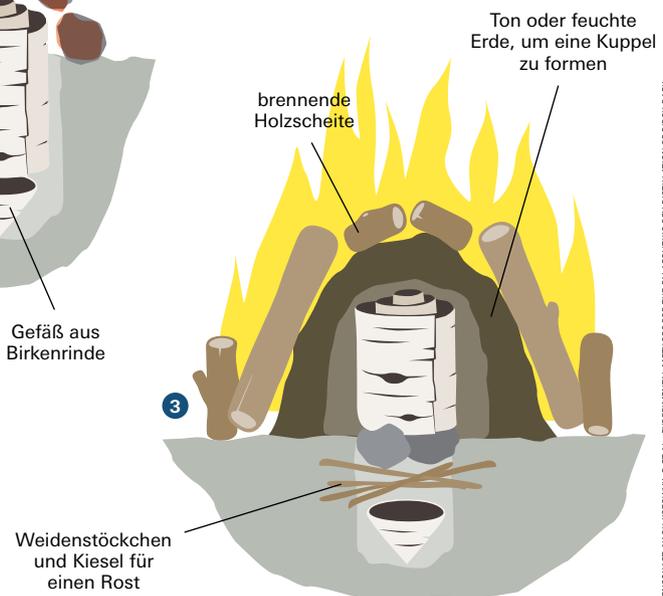
2 Rinde in der Grube

Die Archäologen gruben ein kleines Erdloch, falteten aus Birkenrinde ein Schälchen und legten es in das Loch. Darauf platzierten sie eine Rolle aus Birkenrinde und scharften glühende Kohlen darüber. Bei diesem Aufbau mussten die Forscher weniger Aufmerksamkeit auf Temperatur und Luftausschluss richten. Auch hier tropfte schließlich das Pech aus der Rindenrolle in das Gefäß ab. 100 Gramm Birkenrinde ergaben 2,4 Gramm weiche Masse.



3 Kuppel über Rolle

Diese Methode ist besonders aufwändig. Die Archäologen gruben wieder ein Loch und platzierten darin ein tassengroßes Gefäß aus Birkenrinde. Auf diese breiteten sie einen Rost aus Weidenhölzchen aus, dann legten sie darauf Kiesel und eine Rindenrolle. Anschließend formten sie aus feuchter Erde eine Kuppel über der Rolle. Darüber legten sie Holzscheite und entzündeten ein Feuer. Schließlich bargen die Archäologen 9,6 Gramm Pech, die aus 100 Gramm Birkenrinde entstanden waren.



Die Temperaturen schwankten je nach Verfahren zwischen 250 und mehr als 500 Grad Celsius. Nur in diesem Temperaturbereich kam am Ende Birkenpech heraus, wie die Autoren der Studie schreiben.

Mittels der Kondensationsmethode, also des Verbrennens von Birkenrinde neben einem Stein, von dem das Pech anschließend abgeschabt wird, produzierte das Tübinger Team deutlich weniger Pech: Aus 100 Gramm Rinde kratzte es 0,18 Gramm zusammen. Wie sehr die geringe Effektivität für die Neandertaler eine Rolle spielte, ist jedoch kaum zu ermessen.

Kaugummi aus der Jungsteinzeit

Birkenpech ist klebrig. Daher verwendeten die Menschen der Jungsteinzeit es als Leim – etwa um Steinspitzen an Holzschäften zu fixieren oder Pfeile mit Federn zu besetzen. Doch unsere Vorfahren nutzten den Stoff längst nicht nur als Kleber, wie ein Stück Birkenpech von der dänischen Insel Lolland verdeutlicht. Auf dem unförmigen Klumpen hatte offenbar vor 5700 Jahren eine Jungsteinzeitfrau gekaut. Dafür sprechen jedenfalls Zahnabdrücke in dem ein Zentimeter großen Birkenpechklumpen, den das Team um Theis Jensen von der Universität Kopenhagen analysiert hat.

Schon länger vermuten Fachleute, dass Menschen im Neolithikum Birkenpech als Kaugummi nutzten. Das könnte zum einen eine Möglichkeit gewesen sein, den Kleber weich und formbar zu halten. Andererseits könnte das Kauen auch nur ein Zeitvertreib

gewesen sein oder aber gegen Zahnschmerzen geholfen haben. Für Letzteres sprechen einige antiseptisch wirkende Inhaltsstoffe.

Den Genetikern um Jensen gelang es erstmals, das Erbgut einer Birkenpechkauerin nahezu vollständig aus der Probe zu extrahieren. Anhand der Sequenzdaten vermuten die Forscher, dass die Frau schwarze Haare, dunkle Haut und blaue Augen hatte. Typische DNA-Abschnitte erinnern stark an solche von Sammler- und Jäger-Kulturen aus Kontinentaleuropa – demzufolge hätten sich vor Ort Nachkommen von Wildbeuter-Kulturen parallel zu den Ackerbau-Gesellschaften jener Zeit halten können. Hellere Haut habe sich in diesen Breitengraden offenbar erst später durchgesetzt.



Die Paläogenetiker stießen im Birkenpech-Kaugummi auch auf Fragmente des Erregers *Porphyromonas gingivalis*, der charakteristisch für eine schwere Form der Parodontitis ist, sowie auf Teile des Epstein-Barr-Virus. In der Probe enthaltene DNA-Spuren erlauben außerdem Rückschlüsse auf die Ernährung der Frau: Sie scheint unter anderem Haselnüsse und Stockente gegessen zu haben, bevor sie auf dem Birkenpech herumkaute.

dem leicht nachahmen, was es ermöglicht, Pech gezielt in größeren Mengen zu produzieren. Wird mit mehreren Steinen und brennenden Rindenrollen zugleich gearbeitet, kann innerhalb weniger Stunden genügend Pech zusammengekratzt werden, um einen zentimetergroßen Klumpen wie aus Königsau zu formen.

Die Annahme, Birkenpech könne nur unter Luftabschluss hergestellt werden, ist damit widerlegt. Und mit diesem Ergebnis lassen sich die Funde neu deuten. Zwar wissen wir immer noch nicht, wie die Neandertaler an ihr Pech gekommen sind, aber sie müssen es nicht zwingend durch ein komplexes Verfahren gewonnen haben. Denkbar wären weiterhin verschiedene Szenarien. Vielleicht hatten die Neandertaler zunächst die Kondensationsmethode entdeckt und sie dann zu einer unterirdischen Herstellungstechnik fortentwickelt. Ebenso wäre es möglich, dass die Frühmenschen die Entstehung von Birkenpech mehrfach beobachtet hatten und jeder Entdecker danach eine eigene Art und Weise ausprobierte. Oder: Es hatte in der Altsteinzeit nie eine unterirdische Methode zur Pechherstellung gegeben. Eine Antwort darauf gibt es derzeit nicht.

Deshalb steht fest: Über den Kognitionsaufwand, den Neandertaler für die Birkenpechherstellung tatsächlich aufbringen mussten, lässt sich auch auf Grund der neuen Erkenntnisse keine Aussage treffen. Wir wissen aber, dass die materielle Kultur der Neandertaler das Ergebnis

planerischen Könnens gewesen sein muss. Davon zeugt insbesondere der Umstand, dass sie überhaupt in der Lage waren, Birkenpech zu fertigen und zu benutzen. Unser Ergebnis hat für die Archäologie der Altsteinzeit zudem ganz allgemeine Konsequenzen. Der Vergleich von ähnlichen Objektklassen, die verschiedene Menschenformen einst genutzt haben, sagt demnach noch nichts darüber aus, wie sie die Objekte erzeugt haben. Viele Wege führen bekanntlich nach Rom – ähnlichen Objekten liegen womöglich sehr unterschiedliche Herstellungsmethoden zu Grunde. Auf die Fähigkeiten der Urheber lässt sich also nur rückschließen, wenn die Verfahren sicher bekannt sind. Das ist beim Birkenpech der Neandertaler nicht der Fall – zumindest noch nicht. ◀

QUELLEN

Kozowyk, P. et al.: Experimental methods for the Palaeolithic dry distillation of birch bark: implications for the origin and development of Neandertal adhesive technology. *Scientific Reports* 7, 2017

Rageot, M. et al.: Birch bark tar production: Experimental and biomolecular approaches to the study of a common and widely used prehistoric adhesive. *Journal of Archaeological Method and Theory* 26, 2019

Schmidt, P. et al.: Birch tar production does not prove Neandertal behavioral complexity. *PNAS* 116, 2019

Das Magazin für Kopf, Herz und Bauch



AUSGABE 04.20 JETZT
IM HANDEL ERHÄLTlich!

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

Verpassen Sie kein Heft! Lesen Sie 6 Ausgaben im
Jahresabonnement für nur € 31,20 und sparen Sie fast 12 %
gegenüber dem Einzelkauf! Auch als Digital- oder
Kombiabo erhältlich.

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



Wissenschaft vor 100 und vor 50 Jahren – aus Zeitschriften der Forschungsbibliothek für Wissenschafts- und Technikgeschichte des Deutschen Museums

»UNERHÖRT« GUT ERHALTENES DINOSAURIERFOSSIL

»Ein höchst merkwürdiges Riesentier aus der Vorzeit ist in Frankfurt a. M. im Senckenbergischen Museum aufgestellt worden. Auf der einen Seite blickt man in die offene Brust- und Bauchhöhle. Auf dem Rücken schmiegt sich die eingetrocknete Haut überall dicht um das Knochengestüt. Gut erhaltene Skelette der Dinosaurier sind in zahlreichen Museen aufgestellt, aber die Haut eines Dinosauriers – das ist etwas so Unerhörtes. Aus der Leibeshöhle holte der Präparator [auch] die Reste der letzten Nahrung, zerkautes Pflanzenmaterial, kohlig verfarbt.« *Die Umschau* 27, S. 433–434

Dinosaurierfossil mit versteinerte Haut.



1920

BERG BEI LORCH BRICHT ZUSAMMEN

»An der Mündung der Wisper in den Rhein liegt Lorch am Fuße des Rolling, des wandernden Berges. Geologen beginnen, sich mit dem einst so ruhigen, heute sich so toll gebärdenden Berg zu beschäftigen. [Er] schiebt sich täglich um ein merkbares Stück vorwärts. Immer neue Steinmassen treten aus dem Berginnern und stürzen mit donnerartigem Getöse zu Tal. Niemand weiß bis jetzt, ob Grundwasser oder starke Niederschläge die Ursache dieses plötzlichen Vorganges sind.« *Kosmos* 7, S. 183

EIN RÄUBER, DER SEINE OPFER AUSSAUGT

»Der Ameisenlöwe ist die Larve der libellenähnlichen Ameisenjungfer (*Myrmeleon formicarius* L.). An Waldrändern und anderen trockenen Plätzen baut der Ameisenlöwe seine Fangtrichter. In der Mitte liegt der Räuber mit dem Hinterleib im Sande verankert auf der Lauer, nur seine messerscharfen Zangen ragen aufgesperrt aus dem Sand hervor. Wehe der Ameise, die die steile Trichterwand hinabrutscht. Sofort wird sie von dem Räuber mit den Zangen gepackt und ausgesaugt. Die leeren Chitinhüllen seiner Opfer schleudert der Ameisenlöwe aus dem Trichter, um dessen Rand sich ein Kranz von ausgesaugten Ameisenleichen bildet.« *Kosmos* 7, S. 181–182

VERLIERT DIE MILCHSTRASSE AN ENERGIE UND MASSE?

»Die von *Joe Weber* in Maryland gemessenen Ausschläge der Schwerewellenapparaturen zeigen eine Häufigkeitsverteilung, die darauf schließen läßt, daß das Zentrum der Milchstraße als Quelle einer starken Gravitationsstrahlung fungieren muß. *Weber* errechnete, daß die Gravitationsstrahlung des Milchstraßenzentrums pro Hertz Frequenzbandbreite einen Energieverlust darstellt, der dem Verlust von etwa 0,2 Sonnenmassen pro Hertz und Jahr entspricht. Wenn nun die Milchstraße derart an Masse verliert, so muß sich dies auf die elliptischen Bahnen der Sterne auswirken. Das bedeutet, daß gewisse Sterne immer mehr nach außen wandern und schließlich in den intergalaktischen Raum abwandern.« *Die Umschau* 14, S. 454

TEXTILFASER AUS LAVAGESTEIN DES ÄTNA

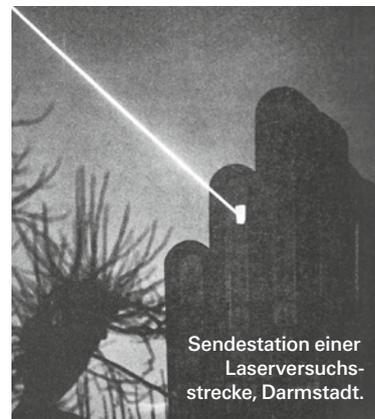
»In einem Industrierwerk in Santa Teresa Riva bei Messina werden Textilfasern aus der Lava des Aetna hergestellt. Diese wird zerkleinert, dann bei 1900 Grad verflüssigt und von einer Zentrifuge zu haarartigen Fäden geformt. Diese elastischen Fasern werden als «Lave-Wolle» bezeichnet und zeichnen sich durch absolute elektrische, akustische und thermische Isolationsfähigkeit aus. Sie werden [im] Haus- und Schiffsbau als Isoliermaterial und Feuerschutz verwendet, das sie bis zu 1100 Grad unverändert bleiben.«

Naturwissenschaftliche Rundschau 7, S. 130

TELEFONIEREN PER LASERSTRAHL

»In der Sprache des Nachrichtentechnikers ist der Laser ein optischer Hochfrequenzsender. Er sendet eine Trägerwelle in Form eines scharf gebündelten Lichtstrahles hoher Intensität aus, die mit einer Information (Sprache, Musik, Bild) moduliert werden kann. Die extrem hohe Trägerfrequenz bei der optischen Übertragung ergibt eine Bandbreite, die ausreichen würde, eine Milliarde Telefongespräche gleichzeitig zu übertragen. Beim Fernmeldetechnischen Zentralamt in Darmstadt [werden] Übertragungsversuche ausgeführt.«

Die Umschau 14, S. 454



Sendestation einer Laserversuchsstrecke, Darmstadt.



FRANK SCHÄPEL (GERMAN FREISTETTER DE/PRESSE) / CC BY-SA 4.0 (REATTICOMMONS ORIGINALS/FR/SAL/DIGITALDDEI)

FREISTETTERS FORMELWELT DIE REGEL, DER DIE WELT GEHORCHT

Man braucht nur vier Symbole, um eines der grundlegendsten Prinzipien der Natur darzustellen. Neben dem Verhalten von Licht beschreibt es auch den effizientesten Weg für Rettungsschwimmer.

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

► spektrum.de/artikel/1736706

Die Vorlesung »Theoretische Physik 1« hat mich in meinem Studium am meisten sowohl fasziniert als auch gefordert. Selbst wenn die dazugehörige Mathematik – zumindest für mich – schwer zu verstehen war, beeindruckten mich die damit beschriebenen Erkenntnisse. Ganz besonders ist mir eine Formel im Gedächtnis geblieben, die auf dem Umschlag meines Lehrbuchs abgebildet war:

$$\delta S = 0$$

Nur vier simple Symbole – und trotzdem steckt darin ein erstaunlich großer Teil der theoretischen Physik. S entspricht dabei der so genannten Wirkung, und der griechische Buchstabe δ symbolisiert die mathematische Operation der Variation. In Worten übersetzt besagt die obige Formel: »Die erste Variation der Wirkung verschwindet«, was Physiker als hamiltonsches Prinzip bezeichnen.

Die Gleichung beschreibt das Verhalten dynamischer Systeme, etwa die Bewegung eines Teilchens im Lauf der Zeit. Solche Probleme kann man ganz klassisch mit den Gesetzen der newtonschen Mechanik lösen. Das 1834 vom irischen Physiker und Mathematiker William Hamilton formulierte Prinzip ist dazu ebenso in der Lage, geht aber noch weit darüber hinaus.

Schon lange vor Hamilton hatte der französische Gelehrte Pierre de Fermat im 17. Jahrhundert ein ähnliches Gesetz hergeleitet. Damals wollte er verstehen, wie Licht sich bewegt, wenn es von einem Medium in ein anderes wechselt. Tritt ein Lichtstrahl zum Beispiel von der Luft aus in Wasser ein, wird er gebrochen, das heißt, er ändert seine Richtung. Aber welchen Weg legt er dabei zurück? Fermats Lösung: Licht nimmt immer die Strecke mit der kürzesten Laufzeit. Das muss nicht zwingend der minimalen Strecke entsprechen.

Angenommen, jemand möchte eine ertrinkende Person retten. Wie kommt man am schnellsten vom Strand zu ihr ins Meer? Der kürzeste Weg wäre eine gerade Linie. An Land ist man jedoch meist schneller als im Wasser. Es kann sich daher lohnen, ein wenig länger am Strand zu laufen, um die Zeit im Meer zu verkürzen. Rennt man zu lange an Land, verliert man den gewonnen Vorsprung wieder. Es gibt einen optimalen Punkt, an dem man ins Wasser eintauchen sollte, um die Zeit zu minimieren.

Genauso bewegt sich Licht von einem Medium ins andere. Die genannten Beispiele sind aber nur Spezialfälle des allgemeineren hamiltonschen Prinzips. Man kann jeder Bewegung eine Wirkung zuordnen. Um diese zu berechnen, benötigt man die so genannte Lagrange-Funktion, welche die Differenz aus kinetischer und potenzieller Energie darstellt. Von allen möglichen Bewegungen wird in der Natur diejenige realisiert, bei der die Wirkung einen Extremwert annimmt. Oft (aber nicht immer) ist das der kleinstmögliche Wert, weswegen das hamiltonsche Prinzip auch als »Prinzip der kleinsten Wirkung« bekannt ist.

Genau das beschreibt die elegante Formel: In der Natur treten nur dynamische Zustände auf, bei denen die Variation der Wirkung verschwindet – was aus mathematischer Sicht bedeutet, dass sie einen Extremwert annimmt. Aus diesem Prinzip kann man die gesamte klassische Mechanik ableiten; es lässt sich jedoch genauso auf die Quantenmechanik und die Relativitätstheorie anwenden.

Ich war damals, am Anfang meines Studiums, extrem beeindruckt, dass vier Symbole ausreichen, um ein so fundamentales Verhalten der Natur zu beschreiben. Natürlich braucht man am Ende doch sehr viel mehr Mathematik, wenn man daraus alle Details ableiten und verstehen will. Aber die Eleganz des hamiltonschen Prinzips fasziniert mich noch heute.

REZENSIONEN

De ofte rivier en zucht waterz wiffen den 7 beuonden /
 hadde een ander vande conde no bi beuonden /
 die wiffend een zij sonderlinge vande name die wij herte lande niet en hene /
 die wiffen



Dit klein viske maet
 gnaet wort Ruemling



blus wyl blerke
 Albe Arbo ling



blurke / blurke
 AB Letti / Arbo ling

Dit klein
 viske gnaet
 Albe Albe



Gobiub fl. a Ron /
 de le to ix hi bitus
 Na my bedenke of dit
 den vnd diene by ons een
 bar der noemt



Dese beud wort gnaet
 Ruem ling / babilen

GERM. Ein
 Rijth ling wort
 dse wiffen
 noemt

In vranckryk
 gnaet Apron



Dese lange vis wort gnaet
 mit hog wyl muller



GALLICE. Gouion, Lugduni Gouion
 GERM. Gob / Cob / Gobe / Guffe /
 Guum wyl Guum



hoerz sinte name Meerputten Erdt
 putten Meerquand / Meer fut
 Stein sig merling / Stein litz / a / flau
 erud / Joym per / de / pup / by te

Dese viske wiffen van dyen daffre datte just dani wiffen /
 rood die beh gnaet mag die dse wiffen gnaet wiffen /
 den gnaet daffre te die van omf daffren hie folo — 99



Gnaet gnaet / gnaet /
 gnaet gnaet / gnaet /

gnaet gnaet / gnaet /
 gnaet gnaet / gnaet /



Sigmer bin / Stein beiff
 In polen / stranik



MVSTELAE fl. nostra, pulcherrima,
 flauo, rufo, rufido, rufo,
 nigra parte ambiente
 ros amob in
 te sunt: &
 propter
 pulchri
 tudine
 Regi
 ferri
 aqua
 qualem lo. Thon /
 Wmij therus unior, thurgus Augustus, ad me dicit. Dit sijnst Jesm 9

Gobius Sismata rotorbundus
 atroh oratoru pupilla
 rufulea, ante pau
 Bohemia rap
 praga



uata uiua
 in uasi apto

KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK DER HAG/AARHAKEN COPIER. VORDECK. MS. 78. 54. F. 205 V. AUS LEWIS-JONES. H. DAS BUCH DES MEERES. MIT PAUL GEN. DES MOMENT BUCHERKUNST

KULTUR DURCH DIE AUGEN DER SEELEUTE

Dieser Bildband versammelt Schiffstagebücher und Kunstwerke von Seefahrern aus dem 14. Jahrhundert bis heute – eine beeindruckende Perspektive auf die Welt der Meere.

► An einem Samstagabend im Jahr 2005 trieb die Britin Roz Savage etwa 800 Kilometer vor der Westküste Afrikas in einem Ruderboot. Ihr Ziel als Teilnehmerin des Ruderwettbewerbs »Atlantic Rowing Race«: die Karibikinsel Antigua. 507 Jahre zuvor und einen Tag früher in der Woche, an einem Freitag, hatte der portugiesische Seefahrer Vasco da Gama von seinem Schiff aus fern am Horizont Land entdeckt – und damit sein Ziel, die Reise nach Indien, vollendet.

Diese beiden Begebenheiten liegen zeitlich und räumlich weit auseinander. Genauso weit und noch ein bisschen weiter spannt der Autor dieses Buchs, Huw Lewis-Jones, seine Darstellung diverser Tage- und Skizzenbücher von seefahrenden Männern und Frauen. Herausgekommen ist ein lesens- und sehenswerter Bildband, der die Aufzeichnungen von 61 Personen bündelt. Zeitlich eingerahmt vom chinesischen General Zhen He (1371–1435) und Roz Savage, gehören dazu berühmte Persönlichkeiten wie Francis Beaufort (1774–1857), der Begründer der noch heute gültigen Windstärkenskala; William Bligh (1754–1817), Kapitän der »Bounty«; oder Admiral Nelson (1758–1805).

Der Bildband präsentiert jedoch nicht nur Dokumente von professionellen Seeleuten, sondern auch von zu See fahrenden »Laien«, etwa die wunderbaren Bilder des Künstlers

Der niederländische Fischer Adriaen Coenen schuf im 16. Jahrhundert ein Visboek (»Fischbuch«) mit Bildern diverser Meerestiere – einen 800 Seiten dicken Wälzer, den er regelmäßig im Rathaus von Den Haag ausstellte.

William Turner (1775–1851) oder des weniger bekannten Marinemalers William Wyllie (1851–1931). Zudem stellt er Werke weitestgehend unbekannter Personen vor, etwa des Fischers Gerrit Westerneng (1858–1959), der sich an einer niederländischen Arktis-Expedition beteiligte, welche zum Ziel hatte, die Spuren des niederländischen Seefahrers Willem Barents (1550–1597) nachzuzeichnen. In dieser Hinsicht ist der Untertitel des Buchs etwas irreführend, denn nicht nur Westerneng, auch viele andere im Buch porträtierte Personen dürften den meisten Lesern nicht bekannt sein.

Gleichwohl lohnt die Lektüre. Denn die fremden Biografien und die Aufzeichnungen von »kleinen Leuten«

Huw Lewis-Jones

DAS BUCH DES MEERES

Tage- und Skizzenbücher großer Seefahrer

Aus dem Englischen von Annika Klapper und Nina Goldt

DuMont, Köln
2020

304 S., € 40,-



lassen wie ein Kontrastmittel die Verdienste bedeutender Seefahrer und Maler noch deutlicher hervortreten. So haben Westernengs Zeichnungen von Robben, Schiffen und Eisbergen etwas Kindliches, während Wyllies lebendige Gemälde den Betrachter regelrecht aufs Meer hinaus versetzen. Dieser Gegensatz zieht sich durch den gesamten Band und macht dessen Reiz sicherlich zum Großteil aus.

Da im Fokus der Darstellung die Skizzenbücher liegen, beschränken sich die Personenbeschreibungen auf je eine Seite. Das ist mitunter zu wenig, um den Menschen tatsächlich näherzukommen – insbesondere, wenn darüber hinaus nicht viel Weiteres über die jeweiligen Akteure zu erfahren ist. Alles in allem lässt sich das Buch aber empfehlen.

Der Rezensent Tim Haarmann ist Geograf und arbeitet in Bonn.

PHYSIK KOMPAKTES FÜR FACHLEUTE

Eine kurze Abhandlung über die Schleifenquantengravitation.

► Seit fast 100 Jahren bemühen sich theoretische Physiker, eine einheitliche Theorie für die gesamte Physik zu finden. Die elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung können sie als Quantentheorien im so genannten Standardmodell der Teilchenphysik vereinigen. Lediglich für die Gravitation ist das bisher nicht gelungen. Der bekannteste Ansatz für die große Zusammenführung sämtlicher fundamentaler Wechselwirkungen ist die Stringtheorie. Daneben gibt es noch den Ansatz der Schleifenquantengravitation, der sich (im Unterschied zur Stringtheorie) dadurch auszeichnet, dass Raum und Zeit selbst quantisierte Größen sind. Der Unterschied zu einer kontinuierlichen Raumzeit macht sich in diesem Modell allerdings nur bei Entfernungen vergleichbar der Planck-Länge bemerkbar, also bei etwa 10^{-35} Meter – das ist ein Wert, der an der 35. Stelle nach dem Komma steht. Und von keinem der beiden Ansätze weiß man, ob sie den richtigen Weg zur großen Vereinigung weisen.

Gerade einmal 92 kleinformative Seiten benötigen die Autoren

Die Physiker Rodolfo Gambini von der Universidad de la República in Uruguay und Jorge Pullin von der Louisiana State University in den USA versuchen sich in diesem Buch an einer kurzen Einführung in die Schleifenquantengravitation, jenes Gebiet, auf dem sie beide arbeiten. Gerade einmal 92 kleinformative, aber groß bedruckte Seiten benötigen sie dafür und spannen dennoch einen weiten Bogen: Nach kurzen Kapiteln über Schwerkraft und Quantentheorie

erläutern sie die Konzepte der Schleifenquantengravitation und diskutieren dann deren Vorhersagen hinsichtlich Schwarzer Löcher und anderer kosmologischer Phänomene. Weitere Kapitel handeln von den möglicherweise beobachtbaren Konsequenzen, wenn diese Theorie richtig wäre, und von einer Weiterentwicklung der Theorie, die häufig als »Spinschaum« bezeichnet wird.

Das Büchlein ist bislang nur in englischer Sprache erschienen. Vermutlich ist dem Verlag klar, dass es sich an eine kleine, speziell vorgebildete Leserschaft wendet. Um dem Text folgen zu können, sollte man zumindest Grundvorlesungen zur Quantenfeldtheorie im Physikstudium gehört haben. Eine breitere Leserschaft wird eindeutig nicht angesprochen.

Angehenden Doktoranden in der theoretischen Physik bietet das Buch eine kompakte und effiziente Einführung à la »Was steckt hinter dem Schlagwort Schleifenquantengravitation, und wäre das eventuell ein Thema, mit dem ich mich tiefer beschäftigen möchte?«. In diesem Sinne kann es gut als Entscheidungshilfe dienen.

Leider ist die Lektüre an manchen Stellen etwas mühsam, denn Gambini und Pullin zitieren Facharbeiten und deren Ergebnisse stets ausgesprochen fair, in dem sie die Namen aller beteiligten Wissenschaftler(innen) nennen. Das macht den Text etwas holprig, denn es bringt Sätze hervor wie: »Autoren A, B und C haben das wichtige Ergebnis erhalten, dass ... D, E und F konnten hingegen kurz darauf zeigen, dass ...«. Insbesondere, wenn die Autoren auf bereits genannte Fakten später noch einmal zurückkommen, ist

es oft schwierig, sich an A, B und C zu erinnern und daran, was bei deren Arbeiten der Punkt war. Das hätte sich gewiss auch anders lösen lassen.

Ein echter Fehler hat sich ebenfalls eingeschlichen: Die allgemeine Relativitätstheorie liefert für die Lichtablenkung am Sonnenrand nicht den Wert 1 Grad, wie im Buch behauptet, sondern nur etwa 1,8 Bogensekunden, was rund ein 2000-stel davon ist. Das ist aber der einzige echte Patzer, der im Werk aufgefallen ist. Und angesichts der vielen Größenordnungen, um die die Effekte der Schleifenquantengravitation zu klein sind, um experimentell nachweisbar zu sein, ist der Faktor 2000 wirklich nicht groß.

Der Rezensent Stefan Gillessen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik.

MEDIZIN DIE UNTERSCHIEDE IM BLICK

Die Gendermedizin untersucht, wie Geschlechterunterschiede die Gesundheit beeinflussen.

► Frauen und Männer erkranken auf unterschiedliche Weise: Ihre Risikofaktoren unterscheiden sich ebenso wie typische Symptome und das Ansprechen auf bestimmte Therapien. In der medizinischen Forschung gelten jedoch meist Männer als Standard. Denn wenn Wissenschaftler neue Medikamente entwickeln, testen sie die entsprechenden Arzneistoffe oft nur an männlichen Probanden, und selbst in den präklinischen Tierstudien meiden sie weibliche Versuchstiere, da deren Zyklus das Ergebnis beeinflussen könnte. »Um Frauen und Männer gleich gut zu behandeln, muss man ihre Ungleichheit anerkennen und ganz konkret erforschen«, davon sind die Autorinnen des vorliegenden Werks überzeugt.

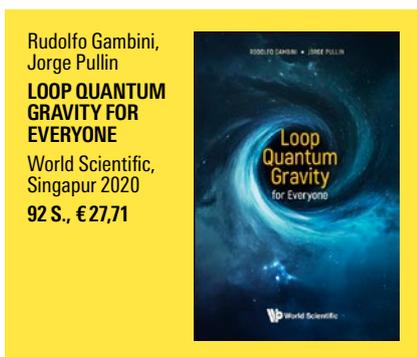
Vera Regitz-Zagrosek ist Gründungsdirektorin des Berliner Instituts für Geschlechterforschung in der Medizin an der Charité und hat sowohl die deutsche als auch die internationale Gesellschaft für Gendermedizin ge-

Frauen sind gesundheitsbewusster, Männer treiben oft mehr Sport

gründet. Gemeinsam mit der Wissenschaftsjournalistin Stefanie Schmid-Altringer gibt sie in dem Werk einen Einblick in die verschiedenen Facetten der geschlechtssensiblen Medizin. Dabei geht es nicht nur um biologische Unterschiede der Geschlechter, sondern ebenso um soziokulturelle Faktoren. Denn die gesellschaftlichen Vorstellungen und Prägungen von Frauen wie Männern wirken sich auf die Gesundheit aus. So gelten Frauen gemeinhin als gesundheitsbewusster, gehen häufiger zum Arzt und ernähren sich ausgewogener, während Männer oft mehr Sport treiben.

Zunächst befassen sich die Autorinnen mit den Gemeinsamkeiten und Unterschieden, die die Gesundheit von Männern und Frauen beeinflussen. Dabei stützen sie sich zum Teil auf wissenschaftliche Studien, die im angehängten Quellenverzeichnis aufgeführt sind. Wiederholt treffen sie aber auch Aussagen, die nicht evidenzbasiert und zum Teil sogar falsch sind. In einer esoterisch angehauchten Gleichsetzung des weiblichen Zyklus mit dem Leben einer Frau ordnen sie hier den Eisprung der »Lebensmitte bis um den 40. Geburtstag« zu. Angeblich erreichten hier »Lust und Fruchtbarkeit [...] ihren Höhepunkt«. Zahlreichen Studien zufolge nimmt die Fruchtbarkeit in diesem Alter jedoch bereits stark ab.

Stellenweise gleicht die erste Buchhälfte einem pseudowissenschaftlichen Diätatgeber. Zwar kritisieren die Autorinnen einerseits den »Selbstoptimierungswahn«, dem aus ihrer Sicht viele Frauen anhängen, geben unmittelbar darauf aber ebenfalls Tipps zur Selbstoptimierung, unterstützt von Slogans wie »Push up your life!«. Überdies empfehlen sie ihren Leserinnen, Homöopathie, Traditionelle Chinesische Medizin oder





»andere wunderbare Gesundheitswege« auszuprobieren, sich dabei vom eigenen »Bauchgefühl« leiten zu lassen und medizinische Autoritäten und Leitlinien kritisch zu hinterfragen. Zu Recht kritisieren sie, die evidenzbasierte Medizin (im Buch unglücklicherweise als »Schulmedizin« bezeichnet) habe viele ihrer Erkenntnisse vor allem an Männern gewonnen. Frauen deshalb jedoch zu Methoden zu raten, denen jegliche Evidenz fehlt, überzeugt nicht.

Die zweite Hälfte des Buchs widmet sich detailliert und medizinisch fundiert verschiedenen Erkrankungen, die sich bei Männern und Frauen jeweils unterschiedlich äußern. Das bekannteste Beispiel ist der Herzinfarkt. Als typisch geltende Symptome wie stechende Brustschmerzen treten vorwiegend bei Männern auf, während Frauen oft unspezifische Symptome wie Luftnot und Übelkeit wahrnehmen. Deshalb werden Herzinfarkte bei Männern in der Regel schneller erkannt, was die Überlebenschancen verbessert. Geordnet nach Organsystemen gehen die Autorinnen auf eine Vielzahl an Krankheiten ein, stellen jeweils die Besonderheiten bei Frauen heraus, erläutern Ursachen, Diagnostik und therapeutische Möglichkeiten und geben Tipps, was Frauen für ihre Gesundheit tun können. Die meisten Tipps sind zwar nicht neu – nicht rauchen, ausreichend bewegen, Symptome ärztlich abklären lassen – haben aber tatsächlich das Potenzial, die Gesundheit zu fördern.

Auch spezielle »Frauenthemen« beleuchten die Autorinnen. Sie informieren beispielsweise verständlich über Entstehung, Vermeidung und Abbruch von Schwangerschaften sowie über Vor- und Nachteile einer Hormontherapie in der Postmenopause. Bei den meisten erläuterten Krankheitsbildern gehen sie überdies darauf ein, wie sich eine Schwangerschaft jeweils auf Verlauf und Therapie auswirkt.

Der zweite Teil des Werks vermittelt somit hilfreiche Informationen zur Gendermedizin, die Frauen dabei unterstützen können, eigene Symptome besser zu verstehen und einzuordnen. Auch für Gespräche mit Ärztinnen und Ärzten kann gendermedizinisches Wissen nützlich sein, etwa um gezielt nach bestimmten Therapien zu fragen. Dank der Gliederung nach Organsystemen eignet sich das Buch weiterhin als Nachschlagewerk.

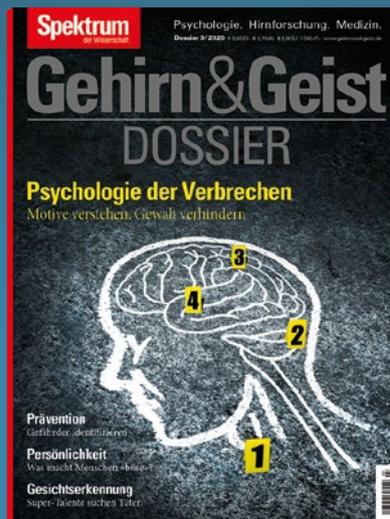
Die Rezensentin Elena Bernard ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

Unsere Themenhefte!

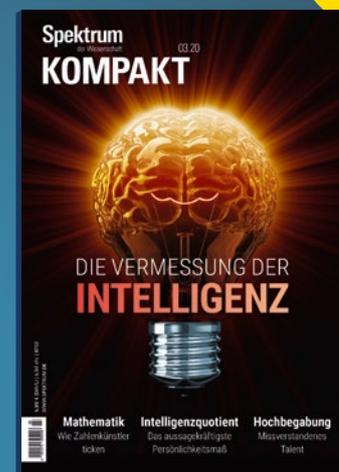
Alle Sonderhefte auch im PDF-Format



Farbenspiele mit Popping Bobas • Die Geheimtinten der CIA • Ein Diamant ist unvergänglich? • Mit Legierungsakkus in die Zukunft • Intelligente Fenster aus Berliner Blau • Minibäume aus Silber, Zinn und Co. • € 8,90



Die dunkle Seite der Persönlichkeit • Gesichtserkennung: Super-Talente suchen Täter • Psychologie im Gerichtssaal • Sind Sexualtäter therapierbar? • Prävention: Gefährder identifizieren • Brandstiftung: Flammen der Frustration • € 8,90



Flynn-Effekt: Warum der Intelligenzquotient nicht weiter steigt • Woran erkennt man intelligente Babys? • »Mozart-Effekt«: Klüger durch Musizieren? • Hochbegabung: Missverständenes Talent • Stereotype: Die Geniefälle • € 5,90

Diese und weitere Themenhefte:

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

www.spektrum.de/shop

PHILOSOPHIE VERURSACHER UND LEIDTRAGENDE

Die Lasten des Klimawandels sind sehr ungleich verteilt. Wie damit umgehen? Eine philosophische Betrachtung.

► »Wir sind hier, wir sind laut, weil ihr uns die Zukunft klaut«, so klang es im Jahr 2019 immer wieder freitags auf den Straßen. Mit Slogans wie diesem bringt die Bewegung »Fridays for Future« ihre Kritik an politischen Entscheidern auf den Punkt, die sich nach wie vor schwer damit tun, effektive Lösungsstrategien zu beschließen, um mit der Herausforderung Klimawandel umzugehen.

Natürlich ist den meisten Demonstrierenden bewusst, dass eine derart verkürzte Kritik den komplexen Sachzwängen nicht gerecht wird, denen sich Staatsmänner und -frauen ausgesetzt sehen. Doch welche Verantwortung haben führende Politiker angesichts des menschengemachten Klimawandels und seiner zahlreichen Folgeprobleme? Warum ist es so schwer, tragfähige Lösungen dafür zu finden? Und ist die Demokratie als Staatsform überhaupt in der Lage, einer so vielschichtigen Herausforderung zu begegnen? Eine ausführliche Auseinandersetzung mit solchen Fragen bietet der Sammelband »Klimawandel und Ethik«, zu dem insgesamt neun Autorinnen und Autoren beigetragen haben – und zwar ausnahmslos Personen, die darüber forschen und lehren.

In neun Kapiteln analysieren die Verfasser zahlreiche Konfliktlinien, die mit dem Klimawandel zusammenhängen. Einige davon sind offensichtlich. Etwa, dass die älteren Generationen einen Großteil der Treibhausgasemissionen zu verantworten haben, die jüngeren aber mit deren Konsequenzen leben müssen. Ähnlich gut bekannt sind Konflikte zwischen Staaten, die mehr oder weniger stark zum Klimawandel beitragen beziehungsweise von dessen Folgen betroffen sind – oft in umgekehrtem Verhältnis. Komplexer wird es bei der

Erläuterung, weshalb die globale Verteilung von Ressourcen, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren beziehungsweise sich an den Klimawandel anzupassen, nicht unabhängig voneinander erfolgen sollte. Und für den Großteil der Leser völlig neu dürfte die Frage sein, ob kausale Verantwortung automatisch mit moralischer Verantwortung einhergeht. Lässt sich eine weitgehend sinnfreie, ressourcenvernichtende Handlung wie eine Spritztour mit dem Verbrenner-Pkw moralisch verurteilen, wenn sie lediglich dann zum Problem wird, sobald viele Menschen dies tun?



Zu derartigen Themen haben Klimathiker und Philosophen wie der Brite John Broome oder die US-Amerikaner Dale Jamieson und Henry Shue bereits in den 1990er Jahren wegweisende Artikel verfasst. Übersetzt sind diese Artikel ebenso in den Sammelband eingeflossen wie neuere Beiträge der deutschen Herausgeber, des Philosophieprofessors Andreas Niederberger und seiner Mitarbeiter Jan Gehrmann und Ruben Langer. Weil die einzelnen Kapitel unter unterschiedlichen zeitlichen und geopolitischen Rahmenbedingungen entstanden sind, spiegeln sie zahlreiche Eindrücke und Sichtweisen wider. Dies erklärt, warum die Autoren teils zu widersprüchlichen Schlüssen gelangen. Dale Jamieson etwa vertritt die Ansicht, unser ökonomisches Wertesystem eigne sich nicht dafür, angemessen auf die Herausforderungen des Klimawandels zu reagieren. Dies betreffe den Kern der Demokratie, weshalb man konsequenterweise über alternative Regierungsformen nachdenken müsse. Jan Gehrmann und Andreas

Niederberger halten dagegen, dass die Demokratie bessere Voraussetzungen biete als andere Staatsformen, um sich multinational und verbindlich auf gerechte Lösungswege zu verständigen.

Angesichts des komplexen Inhalts und der unterschiedlichen Argumentationsmuster in dem Band ist es überaus hilfreich, dass Ruben Langer eine kurze Zusammenfassung liefert sowie die Folgebeiträge einordnet. Dies sowie das Glossar am Ende des Buchs ermöglichen auch solchen Lesern eine Gewinnbringende Lektüre, die kein geisteswissenschaftliches Studium absolviert haben. Anstrengend bleibt es dennoch. Dafür sorgen außer dem Inhalt die langen Sätze und das hohe sprachliche Niveau. Zudem tauchen zahlreiche Fußnoten und Referenzen auf.

Zuvorderst richtet sich das Werk an ein Fachpublikum. Das ist schade, denn während über die geophysikalischen und politischen Facetten des Klimawandels relativ viel Populärwissenschaftliches erscheint, existiert zu den philosophischen Aspekten vergleichsweise wenig allgemein verständliche Literatur.

Die Rezensentin Maren Tiemann ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Bonn.

ÖKOLOGIE PARADIESISCHE WILDGÄRTEN

Die Biologen Bruno P. Kremer und Klaus Richarz geben allen Interessierten das Rüstzeug an die Hand, naturnahe Biotope zu schaffen.

► Mit Bruno P. Kremer möchte man wandern gehen und sich die Natur erklären lassen. Der Biologe ist eine Art Natur-Universalgelehrter, der mit beeindruckend vielen Publikationen und umfassendem naturkundlichem Fachwissen aufwarten kann. Kremer hat enorm viele Bücher geschrieben, etwa über Kulturlandschaften, über Gewässer, über die Eifel, über Mikroskopie und Laborarbeit, über Bäume und Sträucher, den Lebensraum Küste, Schmetterlinge und Bienen – um nur einige seiner Werke zu nennen. Man kommt kaum umhin, Kremer ein wenig

zu beneiden: Wer sich ein so breit gestreutes Wissen erarbeitet hat, muss mit einem ganz anderen Blick durch die Natur gehen. Liest man seinen neuen Band »Tiere in meinem Garten«, den er zusammen mit dem Biologen Klaus Richarz geschrieben hat, kann man ein Stück weit daran teilhaben und gleichzeitig den eigenen Garten naturnäher, ökologischer und interessanter gestalten.

Das Buch untergliedert sich in zwei etwa gleich lange Oberkapitel, die sich damit befassen, auf welche Weise man einen naturnahen Garten schaffen und gestalten kann und wie man darin gezielt Fürsorge für Wildtiere leistet. Das Werk ist weit mehr als ein profaner Gartenratgeber, indem es sehr sachkundig die ökologischen Hintergründe darlegt, die einen so gestalteten Garten wertvoll machen – mit Blick etwa auf Lebensräume in Gehölzen, Blumengärten, Trockenmauern oder Kleingewässern. Zudem gibt das Werk konkrete Tipps, welche Arten jeweils besonders empfehlens-

Bruno P. Kremer,
Klaus Richarz
TIERE IN MEINEM GARTEN

Wertvolle Lebensräume für Vögel, Insekten und andere Wildtiere gestalten

Haupt, Bern 2020
288 S., € 29,90



wert sind, welche Standortbedingungen sie benötigen oder auch, welche Arten oder Bearbeitungsformen besser vermieden werden sollten. So sind gefüllte Blüten, wie die vieler Rosen, zwar sehr schön anzusehen, doch für Bienen nur ein Bluff: in Sachen Nektar Fehlanzeige.

Vertrocknete Sonnenblumen kann man am Ende des Sommers klein schneiden, um dem Garten ein ordentliches Aussehen zu verpassen – womit man Insekten aber Nahrung und Winterquartier nimmt. Ein nach den Prinzipien des Buchs gestalteter

Garten sieht um einiges »unordentlich« aus als einer mit penibel auf drei Zentimeter gestutztem Zierrasen, ist aber ökologisch sehr viel wertvoller und dürfte jenen Tieren einen Lebensraum bieten, die Kremer im zweiten Buchteil mit ihren spezifischen Standortansprüchen beschreibt. Vom inzwischen weithin bekannten Insektenhotel über Brutkästen für Fledermäuse bis zum Laubhaufen für Igel zeigt der Autor dabei, wie man tierischen Gästen den Besuch attraktiv machen kann.

Alle Teile des Werks sind übersichtlich und ansprechend gestaltet und mit schönen Naturaufnahmen und Tierfotos aufgelockert. Das macht das Buch insgesamt sehr lesenswert. Wer bisher noch keinen Garten hatte, möchte sich spätestens nach der Lektüre einen anschaffen – bis dahin kann man einige Tipps auf dem heimischen Balkon ausprobieren.

Der Rezensent Tim Haarmann ist Geograf und arbeitet in Bonn.



Von der Menschwerdung bis in die Neuzeit

Ausgabe 3.20
ab 27.06. 2020
im Handel

Spektrum GESCHICHTE berichtet über die großen und kleinen Episoden der Vergangenheit und zeigt, wie Archäologen und Historiker die ungelösten Rätsel der Menschheitsgeschichte entschlüsseln.

Lesen Sie 6 Ausgaben im Jahresabonnement mit einem Preisvorteil von fast 12 % gegenüber dem Einzelkauf!
Print € 31,20; Digital € 24,60 oder im Kombiabo € 37,20

[spektrum.de/aktion/geschichte](https://www.spektrum.de/aktion/geschichte)
service@spektrum.de – Tel. 06221 9126-743



MODELL MIT GRENZEN

Wann erreicht eine Epidemie wie der gegenwärtige Covid-19-Ausbruch ihren Höhepunkt? Welchen Effekt haben Einschränkungen des öffentlichen Lebens? Mathematische Modellbildung liefert zumindest Teilantworten. (»Wie eine Epidemie verläuft«, »Spektrum« Mai 2020, S. 74)

Silvio Martin, Oberhausen: In dem Artikel schreibt Herr Pöppe, dass es keinen wesentlichen Unterschied macht, wie lange eine infizierte Person andere anstecken kann. Die Information ist aus meinem Aufsatz entnommen, der im Artikel zitiert wird.

Inzwischen würde ich das so nicht mehr schreiben. Das hatte ich aus einer Rechnung mit der um den 12. März hohen prozentualen täglichen Zunahme an Infizierten von zirka 35 Prozent geschlossen. Je steiler die Kurve ist, desto weniger Personen waren N Tage vor dem betrachteten Zeitpunkt schon infiziert, das heißt, desto weniger infizierte Personen fallen schon als Infektionsquelle aus.

Heute, am 19. April, ist das tägliche prozentuale Wachstum ungefähr um den Faktor 15 kleiner, irgendwo zwischen 2 und 2,5 Prozent. Da spielt die Dauer eine sehr große Rolle. Eine erste Rechnung legt sogar den Schluss nahe, dass die Epidemie austrocknen kann, bevor die gesamte Bevölkerung betroffen ist. Die Kurve wird so flach, dass die Differenz der zum betrachteten Zeitpunkt infizierten und der N Tage vorher infizierten Personen gegen null geht. Hier stoßen wir auch an die Grenzen des Modells.

Ein kontinuierliches Modell taugt nur so lange etwas, wie jeden Tag eine ausreichend große Anzahl an Personen infiziert wird. Spätestens, wenn es rechnerisch auf eins oder sogar darunter geht, hat das Modell keine Bedeutung mehr.

Hans Günther Kruse, Heidelberg: In Ihrem wie immer unterhaltsamen Beitrag hat sich ein Fehler eingeschlichen. Vermutlich, da die Differenzialgleichung zeilenweise geschrieben wurde oder weil der Mathematiker nicht gewohnt ist, Dimensionsbetrachtungen durchzuführen. Die rechte Seite der Gleichung auf S. 75, vorletzte Zeile, muss durch G dividiert werden, dann stimmt auch die exakte Lösung. Ich komme deshalb darauf, weil ich ebenfalls mit dieser Gleichung experimentiert habe, um Voraussagen zu treffen. Allerdings habe ich für G nicht die Gesamtpopulation genommen, sondern einen deutlich kleineren Wert. Das erschien mir mit Blick auf China sinnvoll, etwa 100000 offiziell Infizierte mal 10 (Dunkelziffer). Ansonsten stimme ich mit Ihren Ausführungen überein.

Antwort des Autors Christoph Pöppe:

So richtig falsch ist meine Gleichung nicht – sie übersetzt genau das, was im Satz davor steht, in Formeln. Der Ärger ist bloß, dass das k in der Gleichung ja vorher schon anders definiert war. Und damit die Verwendung von k konsistent ist, muss man in der Tat durch G dividieren.

EINE FRAGE DER DARSTELLUNG

Streng mathematisch ist zwar klar, warum Flugzeuge in der Luft bleiben. Aber es fehlt an einem gleichermaßen anschaulichen wie korrekten Modell. (»Das Geheimnis des Fliegens«, »Spektrum« Mai 2020, S. 52)

Klaus Stampfer, Bonstetten: Ich bin Modellflieger und fliege auch Modell-Hubschrauber. Das symmetrische Profil der Rotorblätter ist mit dem Profil von Tragflächen von Kunstflugmaschinen vergleichbar. Durch den sich drehenden Rotor ist deutlich eine senkrechte Luftströmung wahrnehmbar, wenn der Anstellwinkel erhöht wird und der Hubschrauber abhebt. Mit dem Satz von Bernoulli konnte ich mir die Luftströmung durch den Rotor hindurch nach unten nicht erklären.

Meinem Sohn habe ich deshalb erklärt, dass es zwei Kräfte gibt, die den Hubschrauber fliegen lassen: Der Luftstrom, der auf die untere Seite der Rotorblätter trifft, wird durch den Anstellwinkel nach unten abgelenkt, was eine Gegenkraft nach oben bewirkt. Die Luft, die über das Rotorblatt hinwegströmt, hinterlässt durch die Massenträgheit auf der Rückseite ein kleines Vakuum, was dazu führt, dass in diese Zone die Luft von oben hineingezogen wird. Gleichzeitig wird das Rotorblatt in die dünnere Luft darüber hochgezogen. Solange der Anstellwinkel und damit die Zone des Unterdrucks nicht zu groß ist, kann die Luft von oben noch schnell genug beschleunigt werden und liegt am Rotorblatt an. Sonst kommt es zu Verwirbelungen in der Unterdruckzone und zum Strömungsabriss.

Da sich das Rotorblatt weiter dreht, stoßen die von oben kommenden beschleunigten Luftmassen nicht darauf, sondern fließen dahinter weiter nach unten durch und führen zu dem senkrechten Luftstrom. Mein Sohn fragte mich auch, wieso dieser auf den Luftkanalbildern nicht zu sehen ist. Ich erklärte ihm, dass es auf den Standort des Betrachters ankommt – ob man das Profil stehend betrachtet und die Luft vorbeiströmt oder ob man in der Luft steht und das Profil vorbeifliegt.

Ruben Stahlbaum, per E-Mail: Die Potenzialtheorie bietet einen recht intuitiven Zugang zur Entstehung des Auftriebs und der Geschwindigkeits- und Druckverteilung entlang eines Profils, ja des gesamten Tragflügels. Man kann sicher-

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. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.



Farbiger Rauch macht die Luftwirbel hinter einem Flugzeug sichtbar.

lich die dahinterstehende Mathematik weglassen und die wesentlichen Ideen und Ergebnisse skizzieren: Die Umlenkung des Luftstroms wird dabei durch einen Wirbel (genauer: eine Wirbelverteilung) modelliert, dem die gleichmäßige Anströmung überlagert wird. Er lenkt den ankommenden Luftstrom nach unten ab. Dadurch kommt es zu einer Impulsänderung analog zur Argumentation mit Newton und somit zum aerodynamischen Auftrieb. Die Verdrängung der Luft bei Umströmung einer Kontur lässt sich ebenfalls mit der Theorie behandeln, indem man zusätzlich Quellen und Senken einführt.

Geschlossene Konturen entstehen dabei durch die Forderung, dass das aus der Quelle kommende Fluid wieder vollständig in der Senke verschwinden muss. Die Beschleunigung entlang von Stromlinien ergibt sich dann ganz automatisch aus der Überlagerung der genannten Anteile. Bernoulli liefert im Nachgang den Druck in der gesamten Umgebung (McLeans diffuse Wolke). Die Visualisierung mittels Stromlinien gibt einen sehr anschaulichen Eindruck der Gegebenheiten, wie es im Artikel auch versucht wurde. Die Theorie macht eine wichtige und überprüfbare Vorhersage: Wirbel formen geschlossene Linien, wobei die Wirbelstärke in Näherung proportional zur Masse des Flugobjekts ist. An den Tragflügelenden entstehen Wirbel, die nach hinten abgehen und zum Beispiel in Kondensstreifen zum Teil minutenlang beobachtbar sind. Auf Flugplätzen werden bei Starts und Landungen nach großen Flugzeugen entsprechende Pausen nötig, da die rotierenden Luftmassen eine Gefahr darstellen können.

Was ist Ursache, und was ist Wirkung? Magie hat hier jedenfalls keinen Platz. Es geht vielmehr darum, wie herum die Frage gestellt wird. Die Strömungsverhältnisse stellen

sich gleichermaßen ein, egal ob sich ein Objekt durch ein ruhendes Medium bewegt oder wie im Windkanal ein ruhendes Objekt umströmt wird. Schade, der Artikel hätte großes Potenzial gehabt, den Auftrieb am Tragflügel anschaulich und verständlich darzustellen.

GESTECKT, NICHT GESCHNÜRT

Wissenschaftler haben topologische Knotendiagramme mit mechanischen Informationen verbunden. Das Ergebnis: ein einfaches Verfahren, das die Stabilität vieler Knoten beurteilt. (»Welcher Knoten hält am besten?«, »Spektrum« Juni 2020, S. 84)

Michael Speichert, Uetersen: Der auf S. 89 gezeigte untere Knoten ist kein Altweiberknoten, sondern ein Diebes- oder Rauschknoten. Letzterer kann auch nicht aus Versehen beim Binden der Schnürsenkel entstehen, sondern muss gesteckt werden. In »Schlichting!« in Heft 7.17, S. 70 und dem Leserbrief von Herrn Gims dazu in Heft 8.17 wurden die drei Varianten des Kreuzknotens mit ihren Eigenschaften korrekt beschrieben. Schade, dass im Artikel über die mathematischen Hintergründe die Schnürsenkelproblematik als Beispiel dient. Dieser Bezug hat mehr verwirrt als zur Klarheit beigetragen, denn warum die zwei »falschen« Kreuzknoten so viel leichter aufgehen, ist mit der gleichen Drehrichtung verständlich erklärt.

ERRATUM

»Nützliche Bakterienkiller«, »Spektrum« Juni 2020, S. 40
Die Skala im Bild auf S. 42 macht Phagen um den Faktor eine Million zu groß. Bei der Beschriftung sollte es 50 nm lauten statt 50 mm.

Alien, geh nach Hause!

Daheim ist es doch am schönsten. Eine Kurzgeschichte von Filip Wiltgren

Henry James starrte das Schriftzeichen an, das »abgelehnt« bedeutete. Er war sich zumindest ziemlich sicher, dass das der Sinn der Glyphe war. Die Schrift des Blaschs sah aus wie Spagettiportionen, die nebeneinander auf einen Langhaartteppich gekippt worden waren. Aber der nach links weisende Haken bedeutete in der Regel »nein«, und die zwei gegensätzlich drehenden Wirbel standen für »offiziell«, »Macht« und gelegentlich für »Betätigen der Wasserspülung«.

»Aber warum?« fragte er. Er hoffte, dass er sich halbwegs verständlich ausdrückte. Blisch-blosch war eine Körper- und Zeichensprache, die normalerweise darin bestand, dass der Blasch mit seinen zahlreichen tintenfisch-ähnlichen Armen wedelte und klatschte. Henry behalf sich, indem er mit der Zunge schnalzte, mit den Lippen flatterte, in die Hände klatschte und energisch Nasenschleim hochzog. Dabei war eine Erkältung ungemein hilfreich, aber die Blaschs duldeten auf ihren Raumstationen keine infizierten Aliens. Glücklicherweise erzeugte das Schnüffeln von Chilipfeffer und gemahlener Senfkörnern eine fast ebenso reichlich rinnende Nase.

»Abgelehnt«, sagte der Blasch, ein purpurner, 86-armiger Vertreter des mittleren Managements mit zwei Dellen in seinem Kopfsack, die ebenso viele Beförderungen anzeigten. Er sprach bemüht langsam, machte extra große Wellenbewegungen mit den Armen und knallte sie besonders laut und kräftig zusammen.

Die Schrift der Blasch sah aus wie Spagettiportionen auf einem Langhaartteppich

»Aabbeerr wwaarruumm?«, artikulierte Henry, wobei er sich fast den Arm ausrenkte. Er blickte kurz zu dem Übersetzer, der am Rand des Arbeitsteichs saß, in dem der Blasch schwamm. Das Gerät war ein umgebautes Standardmodell: an einem Ende Mikrofon und Lautsprecher, am anderen eine Gruppe wellenförmiger Arme. Leider war der Übersetzer außer Betrieb.

Der Blasch glaubte anscheinend, die Integration von Aliens ließe sich am besten fördern, indem man sie zwang, möglichst schnell Blisch-blosch zu lernen. Dem galakti-

schen Protokoll zufolge musste zwar bei allen offiziellen Begegnungen zwischen intelligenten Aliens ein Übersetzungscomputer zur Verfügung stehen. Der Blasch interpretierte diese Bestimmung allerdings in ganz wörtlichem Sinn. Kein Passus im galaktischen Gesetz schrieb vor, dass der Übersetzer eingeschaltet sein müsse.

Henry konnte den Übersetzer aktivieren, aber das war ihm nur für insgesamt 11,2 Minuten pro Blasch-Arbeitszyklus von 22 Tagen erlaubt. Wenn er mehr verlangte, musste er dafür mit einem Arm und einem Bein bezahlen – und zwar buchstäblich, denn bei den Blaschs wuchsen abgetrennte Arme nach, und sie aßen alles, was ihnen unterkam, sich selbst eingeschlossen.

»Keine Gefahr«, gestikulierte der Blasch. »Kein Asyl nötig. Krieg zu Ende. Mensch, geh nach Hause!«

»Aber wohin?«, versetzte Henry.

»Nnaachch hhaaussee«, wiederholte der Blasch, wobei er seine wedelnden Arme so langsam bewegte, als wollte er sich einem Neugeborenen verständlich machen.

»Aber die Erde ist zerstört!«, schrie Henry. Dann beruhigte er sich so weit, dass er dasselbe in Blisch-blosch formulieren konnte.

Der Blasch machte große Augen, indem er die zehn lichtempfindlichen Kugeln ein Stück weit aus seinem Kopfsack hervortreten ließ; das bedeutete Zustimmung.

»Jawohl«, meinte er. »Kein Krieg.«

»Kein Zuhause!«, antwortete Henry.

»Zuhause«, erwiderte der Blasch und zeigte auf ein Hologramm-Video des Sonnensystems. Die Sonne bildete darin eine verwirbelte rote Wolke; über ihre Ränder trieben Flecken kühlerer Materie, jeweils größer als Jupiter, die sich langsam erhitzen. Soweit Henry in den Nachrichten gesehen hatte, war das eine Folge des Beschusses mit Gravitationsgranaten.

Merkur streifte den Außenrand der Sonnenkorona – ein Klumpen geschmolzenen, glühenden Gesteins. Venus sah weitgehend unverändert aus, ebenso Saturn mit seinen Ringen. Die Erde hatte sich allerdings in eine Masse von Gesteinsbrocken und Staub verwandelt, die sich langsam in die Umlaufbahnen mehrerer Planeten ausbreitete.

Henry unterdrückte die aufsteigenden Tränen. Er war auf der Erde zur Schule gegangen, bevor er seine Tests in der Schwerelosigkeit bestanden und sich auf den Weg in die Galaxis gemacht hatte. Er versuchte, nicht an seine Familie zu denken. Das misslang ihm.

»Kein Essen im Amt«, signalisierte der Blasch. »Salz verboten.«

Er zeigte auf die Träne auf Henrys Wange. Schnell wischte Henry den Tropfen mit einem neutralisierenden Tuch ab,

das die Menschen auf Befehl der Blaschs jederzeit bei sich haben mussten. Auf der Wange blieb ein schmutziger, juckender Streifen zurück.

»Kein Zuhause«, sagte Henry und deutete auf die Wolke von Asteroiden, die dort dahintrieben, wo einmal die Erde gewesen war.

»Gestein«, sagte der Blasch. »Menschen leben Gestein.«

»Doch nicht so!«, schrie Henry. »Nicht auf einem Eisenklumpen ohne Luft und Leben.«

Er durfte nicht erwarten, dass sein wildes Gestikulieren irgendeinen Sinn auf Blisch-blosch ergab. Dennoch musste der Blasch seine Aufregung einigermaßen verstanden haben. Er vergrößerte das Bild der Materiewolke, aus der vormals die Erde bestanden hatte.

»Gestein«, sagte der Blasch und zeigte auf ein Bruchstück der Erdoberfläche. Dort stand das Fragment einer Arkologie, einer autarken Superstadt, die sich einst kilometerhoch in den Himmel erhoben hatte. Es musste sich dabei um ein gewaltiges Stück handeln; dafür sprach jedenfalls der Größenvergleich mit einer gleich daneben abgestürzten Korvette der United Space Force.

Und in der Arkologie brannte tatsächlich Licht: Einige Zimmer hatten Strom!

»Erde Gestein«, sagte der Blasch. »Kein Krieg. Keine Gefahr.«

Er deutete auf die Glyphe auf dem Formularenschirm vor Henrys Nase. Flüchtlingsstatus verweigert.

»Alien, geh nach Hause!«, erklärte der Blasch abschließend. Dann winkte er mit seinen zahlreichen Armen den Sicherheitsbeamten, damit sie Henry abtransportierten. ◀

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

nature.com/futures, 11. März 2020

DER AUTOR

Filip Wiltgren ist bei Tag zuständig für Öffentlichkeitsarbeit an der Universität Linköping. Nachts ist er Schriftsteller und Game-Designer. Er lebt mit Frau und Kindern in Schweden.

Spektrum der Wissenschaft

Chefredakteur: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

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. Markus Fischer, Dr. Claudia Hecker, Dr. Michael Springer

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

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,-; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,-, PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

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

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

Anzeigen: E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-600

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 41 vom 1.1.2020.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2020 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

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: Laura Helmuth, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Floreck, Vice President Magazines: Stephen Pincock



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



VORSCHAU



SANKMESTERKE / GETTY IMAGES / ISTOCK, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DIE JAGD NACH X17

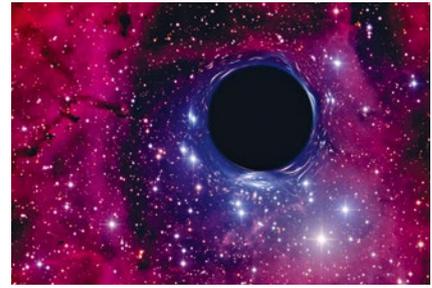
Seit Jahren sorgen Messergebnisse eines ungarischen Forscherteams für Aufsehen: Es will ein bisher unbekanntes Elementarteilchen aus Atomkernen herausgekitzelt haben. Dieses X17 wäre Bote einer neuen Kraft im Mikrokosmos und könnte bei der Entschlüsselung der Dunklen Materie helfen. Aber gibt es das exotische neue Teilchen wirklich? Oder steckt ein Messfehler hinter der Anomalie? »Spektrum der Wissenschaft« war vor Ort und berichtet, was von den spektakulären Ergebnissen zu halten ist.



VERISIMILUS AT ENGLISH WIKIPEDIA (COMMONS:WIKIMEDIA:ORG/WIKI/FILE:DICKINSONIA COSTARA.JPG) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/RY-SA3.0/LEGAL/004E)

AUFSTIEG DER TIERE

Lange glaubte man, komplexe Tiere seien erstmals im Kambrium entstanden. Immer mehr Fossilfunde deuten aber darauf hin, dass sie schon Jahrmillionen früher während der Ediacara-Zeit erschienen. Neue Untersuchungsmethoden liefern nun Erkenntnisse darüber, welche Selektionsdrücke diese evolutionäre Entwicklung vorantrieben.



BRIGHTSTARS / GETTY IMAGES / ISTOCK

WURMLÖCHER IM LABOR

Zwei Schwarze Löcher, die durch ein Wurmloch verbunden sind, könnten eines der größten kosmologischen Rätsel lösen. Nun haben Physiker eine Möglichkeit vorgeschlagen, ein solches Experiment im Labor durchzuführen – mit ultrakalten Atomen.



BRITISH MUSEUM, MIT FOL. GEN. VON LORENZ RAHNSTORF

DAS ERSTE »GELD« EUROPAS

Goldringe, ganz oder gestückelt, Waagen und Gewichte – Archäologen haben akribisch bis zu 3300 Jahre alte Funde aus Westeuropa analysiert und festgestellt: Anders als bisher angenommen nutzten die Menschen der Bronzezeit bereits ein Maßsystem, um Warenwert und Profit zu berechnen. Es gab also offenbar eine Art Währung.

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!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!



ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,-), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



KOMBIABO:

Für nur € 6,-/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



Spektrum PLUS:

Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserexkursionen und Redaktionsbesuche.

Jetzt bestellen!

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

www.spektrum.de/abo

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **21**
23.05.2020

- > Vanillin aus Holzabfall
- > Wer entwickelt eine Computerspielsucht?
- > Künstliche Intelligenz entdeckt Gravitationslinsen

TITELTHEMA: AEROSOLE

Steckt das neue Coronavirus in schwebenden Tröpfchen?

Viel spricht dafür, dass winzige, in der Luft schwebende Tröpfchen das Coronavirus verbreiten. Das würde Innenräume, Sprechen, Singen riskant machen. Doch der Beweis fehlt.

60 JAHRE LASER
Ein ganz besonderes Licht

LEBENSFRAGEN
Worin wir Sinn finden

COMEBACK DES WOLFS
Der Wolf hätte fast überall Platz

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

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

www.spektrum.de/abonnieren

