

Spektrum

der Wissenschaft

Schwarze Löcher

So zerreißen sie ganze Sterne



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

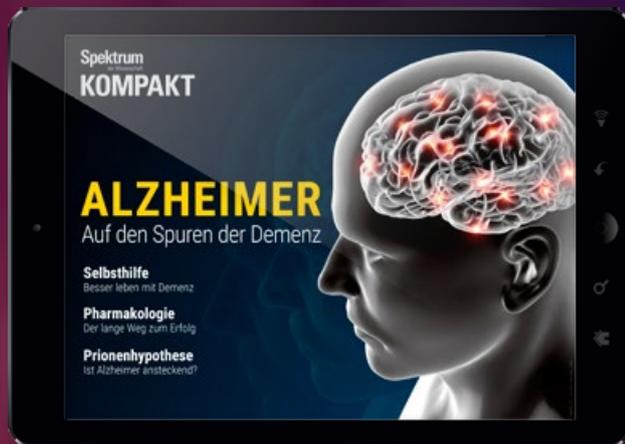
HIV-IMPfung Die Achillesferse des Aidsvirus
KI Ein Roboter muss Nein sagen können
ANTIBIOTIKA Massentierzucht produziert Superkeime



KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

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

€ 4,99
je Ausgabe



Bestellmöglichkeit und weitere Ausgaben:

www.spektrum.de/kompakt



EDITORIAL WAS FOLGT AUF DEN MARSCH?

Carsten Könniker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Am 22. April wurde weltweit für Wissenschaft demonstriert. In Deutschland schlossen sich wohl bis zu 40000 Menschen in rund 20 Städten dem »March for Science« an. Ein einmaliges Ereignis in der Wissenschaftsgeschichte! Doch was trieb die Marschierenden auf die Straße? War es Ärger über die Wissenschaftspolitik von Donald Trump? War es die Sorge um den Stellenwert von Argument und Evidenz in gesellschaftlichen Debatten? Oder wollten die Demonstranten schlicht ihre Begeisterung für Forschung artikulieren?

Eine Befragung unter 340 Teilnehmern am deutschen »Marsch für die Wissenschaft«, die ich mit initiiert habe, liefert Hinweise auf Antworten. Ganz vorn bei den Motiven rangierten Ziele wie »Ich möchte, dass wissenschaftliche Evidenz in Debatten und bei politischen Entscheidungen mehr Gehör findet« und »Ich möchte populistischen Strömungen in unserer Gesellschaft entgegentreten«. Die Zustimmungswerte in der Stichprobe lagen hier bei mehr als 90 Prozent. Einen konkreten Protest gegen die US-Regierung gab hingegen nur etwa jeder zweite Befragte als Beweggrund an; weit davor standen noch Ziele wie mehr Menschen außerhalb der Forschung mit Wissenschaft vertraut zu machen oder die eigene Leidenschaft für Forschung auszudrücken. Gefragt wurde zudem, ob das Vertrauen der Bürger in die Wissenschaft schwindet. Mehr als 40 Prozent stimmten dieser Diagnose zu; dagegen hielten weniger als 20 Prozent. Sämtliche Ergebnisse finden Sie auf www.wissenschaftskommunikation.de/science-march-deutschland-wer-marschiert-da-und-wofuer-4487.

Die zentrale Frage lautet nun, was auf den »March for Science« folgt. Mit ihm hat man sich – in immer noch recht überschaubaren, meist regionalen Zirkeln – einmal der gemeinsamen Wertschätzung für Wissenschaft vergewissert. Und weiter? Ich werte den »Marsch« als Ausdrucksmittel, dem weitere Kommunikation folgen muss. Wir brauchen mehr Forscherinnen und Forscher, die sich mit Namen und Gesicht auch jenen Teilen der Bevölkerung zuwenden, die Forschung und Bildung gegenüber eine agnostische oder skeptische Haltung einnehmen. Und die Kommunikation muss sich aus dem einseitigen Verkündigungsmodus befreien. Wer reden will, muss auch bereit sein zuzuhören!

Herzlich grüßt Ihr



NEU AM KIOSK AB 16.6.!

Eine Gesamtschau über 11000 Jahre menschlicher Monumentalbauten gibt unser **Spektrum Spezial** Archäologie – Geschichte – Kultur 2.17.

AUTOREN DIESER AUSGABE



S. BRADLEY CENKO UND NEIL GEHRELS (†)

Die beiden NASA-Astronomen haben sich auf extreme Phänomene spezialisiert, wie etwa das Ende von Sternen in Schwarzen Löchern. Darüber berichten sie ab S. 12.



ROGIER W. SANDERS, IAN A. WILSON UND JOHN P. MOORE

20 Jahre benötigten die amerikanischen Forscher, bis sie ein Molekül am Aids-Virus so verändert hatten, dass es sich voraussichtlich für einen Impfstoff gegen HIV eignet (S. 50).



MATTHIAS UNTERMANN

Immer höher strebten gotische Kathedralen. Doch wann erfanden französische Baumeister Strebepfeiler und Maßwerk? Das fragt der Heidelberger Historiker ab S. 72. Grabungen widerlegen die bisherigen Lehrmeinungen.

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Tsunami im Perseushaufen

Unruhiger Lavasee auf Io

Cannabis hält alte Mäuse fit

Homo naledi ist jünger als gedacht

Das Geheimnis der Bologneser Tränen

Angeborene Kategorisierung von Farben

Wundkleber verhindert Narben

24 FORSCHUNG AKTUELL

Technetium-99m

Ein wichtiges Isotop der Nuklearmedizin wird knapp.

Virtuelle Schläferagenten

»Star Wars«-Zitate entlarven ein riesiges Bot-Netzwerk.

Spektroskopie mit Antimaterie

Forscher haben Atome aus Antiwasserstoff vermessen.

33 SPRINGERS EINWÜRFE

Automatische Vorurteile

Künstliche Intelligenz reproduziert sprachlich verankerte Stereotypen.

70 SCHLICHTING!

Wenn Schnürsenkel versagen

Katastrophales Aufschaukeln kleiner Effekte löst jede noch so feste Schleife.

79 FREISTETTERS FORMELWELT

Warum jeder (fast) jeden kennt

Der »Kleine-Welt-Effekt« zeigt sich auch bei der Koautorschaft in mathematischen Veröffentlichungen.

12 ASTROPHYSIK **SCHWARZE LÖCHER ALS STERNZERSTÖRER**

Kommt ein Stern einem massereichen Schwarzen Loch zu nahe, reißt dieses ihn in Stücke. Die Details solcher stellaren Katastrophen geben Aufschluss über die gewaltigsten und rätselhaftesten Objekte im Kosmos.

Von S. Bradley Cenko und Neil Gehrels

20 INTERVIEW

SCHATTENWURF DES SCHWARZEN LOCHS

Der Physiker Michael Kramer berichtet vom erdumspannenden Teleskopnetzwerk, mit dem Astronomen ins Herz der Milchstraße blicken.

34 TIERHALTUNG **TICKENDE ZEITBOMBE**

Die Belege mehren sich: Massentierhaltung bringt superresistente Keime hervor, die auf den Menschen überspringen können.

Von Melinda Wenner Moyer

46 INTERVIEW

KAMPF FÜR AFRIKAS TIERWELT

Seit Jahrzehnten engagiert sich der berühmte Paläontologe Richard E. F. Leakey an vorderster Front gegen die Wilderei von Elefantenstoßzähnen und Nashornhörnern in Kenia.

Von Richard Schiffman

50 MEDIZIN **DIE ACHILLESFERSE DES AIDSVIRUS**

Auf Basis eines manipulierten Oberflächenmoleküls des HI-Virus wollen Wissenschaftler jetzt endlich einen effektiven, breit wirkenden Impfstoff gegen den tödlichen Erreger herstellen.

Von Rogier W. Sanders, Ian A. Wilson und John P. Moore

56 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

FARBENSPIELE MIT POPPING BOBAS

Chemische Reaktionen in Bubble-Tea-Kügelchen sorgen für faszinierende Effekte.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

62 RAUMFAHRT

AUFBRUCH NACH ALPHA CENTAURI

Winzige Raumsonden könnten mit Hilfe von Lichtsegeln und Laserstrahlung den nächstgelegenen Stern erreichen – in nur rund 20 Jahren.

Von Ann Finkbeiner

72 KATHEDRALEN **ZEICHEN DER MACHT**

Serie: Kultbauten der Menschheit (Teil 3) Im 12. Jahrhundert erfanden französische Baumeister die Gotik – zu Ehren Gottes und der Bischöfe.

Von Matthias Untermann

80 COMPUTERWISSENSCHAFT

BEFEHLSVERWEIGERUNG DURCH ROBOTER

Eine künstliche Intelligenz muss Nein sagen können, damit ein missverstandener oder böswillig erteilter Befehl keinen Schaden anrichtet.

Von Gordon Briggs und Matthias Scheutz

ROY MILLER



12

TITELTHEMA
**SCHWARZE LÖCHER
ALS STERNZERSTÖRER**

PATRICK CAVANI BROWN



34

TIERHALTUNG
TICKENDE ZEITBOMBE

EXCLUSIVE-DESIGN / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



56

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN
**FARBENSPIELE
MIT POPPING BOBAS**

STAN MUSILEK



62

RAUMFAHRT
**AUFBRUCH NACH
ALPHA CENTAURI**

RAYUSCOMBE / GETTY IMAGES / ISTOCK



72

KATHEDRALEN
ZEICHEN DER MACHT

84 REZENSIONEN

Leonard David: Mars

Alain Demurger:

Die Verfolgung der Templer

Hubertus von Treuenfels:

Gesund beginnt im Mund

Dirk Eidemüller:

Quanten – Evolution – Geist

Ernst Peter Fischer:

Treffen sich zwei Gene

Rolf Drechsler, Andrea

Fink, Jannis Stoppe:

Computer

93 ZEITREISE

Von der Seilbahn über die

Niagarafälle zur Antigalaxie

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

**Sicherheitshinweise
für menschliche Läufer**

Mit ein wenig Vorsicht ist
Freizeitsport ungefährlich.

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

Titelbild:

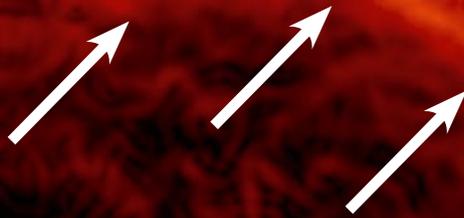
ESO, ESA/Hubble, M. Kornmesser
(www.eso.org/public/images/eso1644b/) / CC BY 4.0 (creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode); Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft

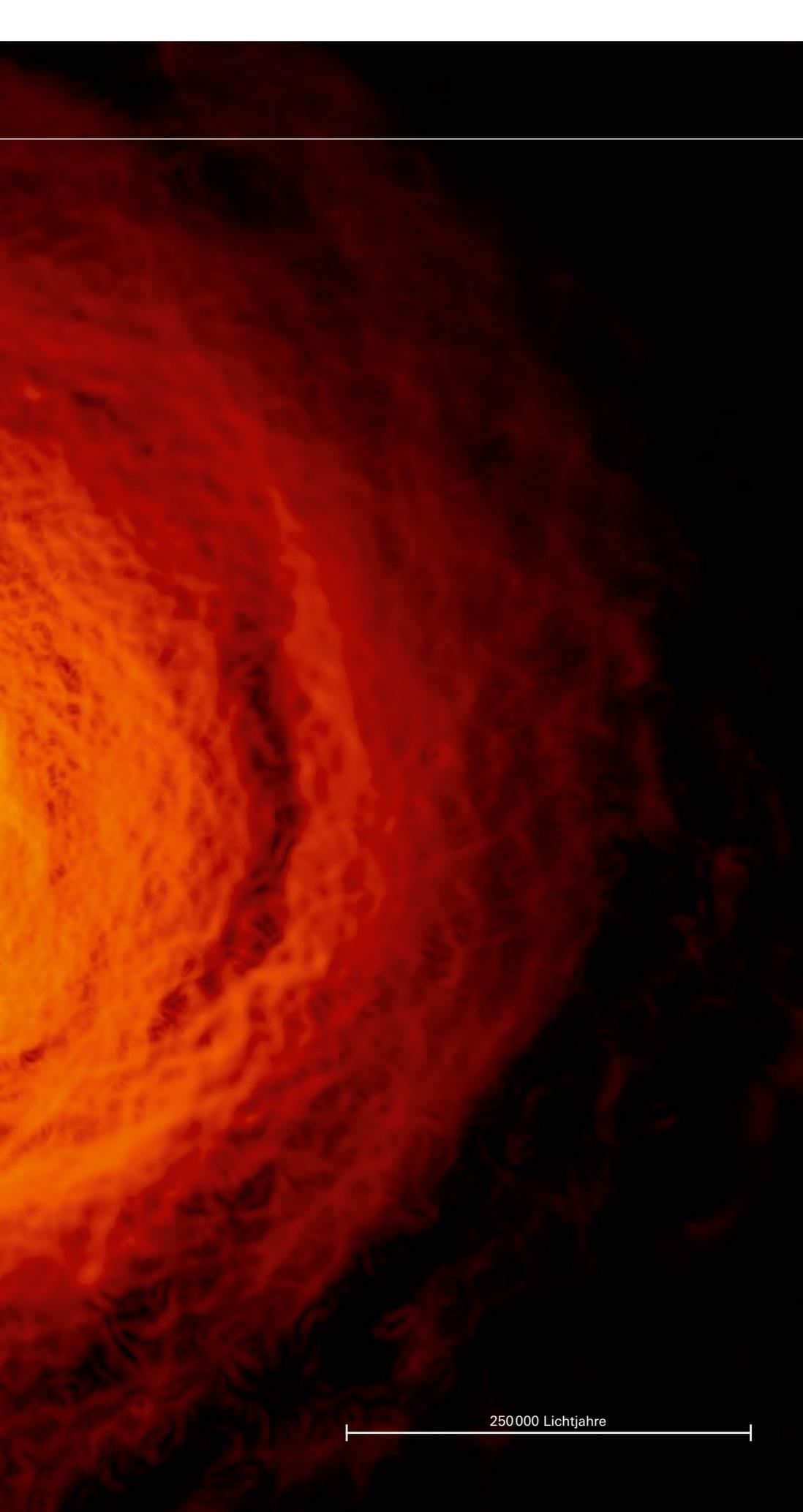


Alle Artikel auch digital
auf **Spektrum.de**

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

SPEKTROGRAMM





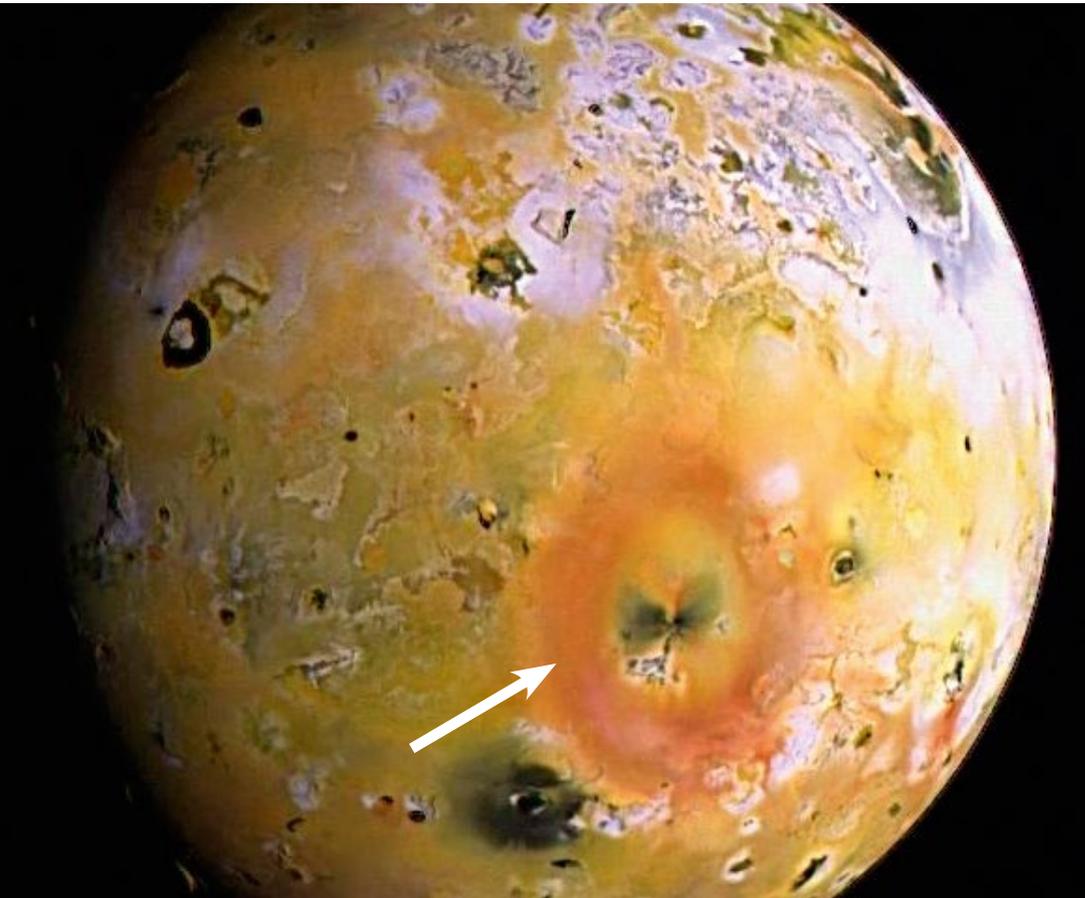
TRUBEL IM GALAXIENHAUFEN

► Durch den Perseushaufen rast ein riesiger Tsunami aus heißem Gas. Das berichtet eine Forschergruppe um Stephen Walker vom NASA Goddard Space Flight Center in Greenbelt nach Auswertung von Aufnahmen des Röntgensatelliten Chandra. Der 240 Millionen Lichtjahre entfernte Haufen besteht aus etwa 1000 Galaxien, die in eine dünne Gaswolke eingebettet sind. Vor einigen Milliarden Jahren flog eine kleinere Galaxiengruppe an dem Gebilde vorüber, vermuten die Astronomen. Die Beinahe-Kollision ließ große Mengen Gas bis tief ins Weltall schwappen (in der hier abgebildeten, nachbearbeiteten Aufnahme ist es in Rot- und Gelbtönen dargestellt). Am linken unteren Rand der umherwabernden Wolke ist eine nach oben gewölbte, bogenförmige Struktur sichtbar (Pfeile). Der Vergleich mit Computersimulationen legt nahe, dass es sich dabei um eine 200 000 Lichtjahre messende Woge handelt, die seit Milliarden von Jahren im Kreis läuft.

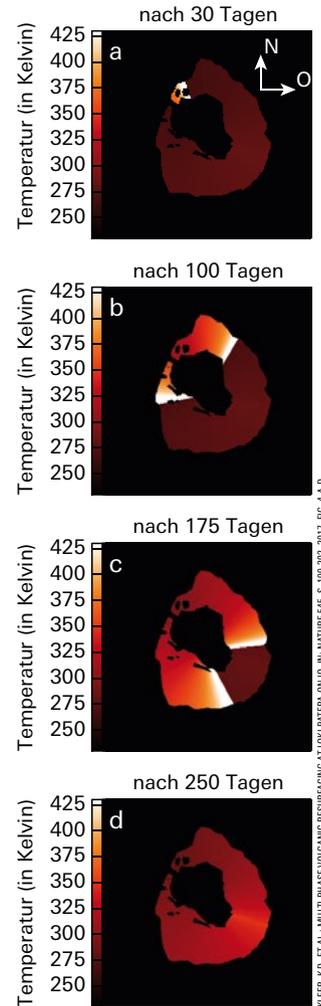
Mon. Not. R. Astron. Soc. 10.1093/mnras/stx640, 2017

250 000 Lichtjahre

NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER / STEPHEN WALKER ET AL.



Zahlreiche Vulkane bedecken den Jupitermond Io. Einer der berühmtesten ist Loki Patera, ein ringförmiger Lavasee (Pfeil). Mit Computersimulation haben Forscher rekonstruiert, wie seine Oberfläche von zwei gegenläufigen Lavawellen erneuert wird (rechts).



ASTRONOMIE UNRUHIGER LAVASEE

► Loki Patera ist der stärkste aktive Vulkan des Sonnensystems. Er befindet sich auf dem Jupitermond Io und verblüfft Astronomen seit Jahrzehnten. Denn die kraterähnliche Vertiefung, in deren Mitte eine Insel aus einem Lavasee ragt, ändert immer wieder ihr Aussehen. Forscher vermuten, dass aus der Tiefe aufsteigendes Magma die Oberfläche des Sees alle paar Jahre umwälzt.

Nun glaubt ein Team um Katherine de Kleer von der

University of California in Berkeley, den Prozess im Detail verstanden zu haben. Die Region wird demnach regelmäßig von gewaltigen Lavawellen durchwalzt. Die Forscher nutzten ein besonderes astronomisches Ereignis für ihre Beobachtung: Am 8. März 2015 zog der Jupitermond Europa aus unserer Sicht vor seinem Nachbartrabanten Io vorbei und verdeckte dabei zeitweise den 200 Kilometer messenden Lavasee. Mit dem Large Binocular Telescope im US-Bundesstaat Arizona registrierten die Astronomen die Lichtkurve während dieses Transits. Dank

den so gewonnenen Daten konnten sie eine präzise Temperaturkarte der Region erstellen.

Sie zeigt, dass die Oberfläche der Lava vom Nordwest- zum Ostrand hin wärmer wird. Dieses Temperaturgefälle lässt sich Computersimulationen zufolge durch zwei Wellen erklären, die im Norden beziehungsweise im Nordwesten der Region entstehen. Von dort breiten sie sich in entgegengesetzte Richtungen aus, wobei sie ein beziehungsweise zwei Kilometer pro Tag zurücklegen. Sobald eine Woge eine Region passiert hat, kühlt die Oberfläche dort rasch

ab. Etwa 200 Tage nach dem Start treffen die beiden Wellen schließlich am Südostrand von Loki Patera aufeinander und kommen zum Erliegen.

Zum Beobachtungszeitpunkt lag das Ende der letzten Umwälzung bereits zwei bis drei Monate zurück, schätzen die Astronomen. Wegen der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten und Startzeitpunkte der beiden Wellen gehen sie außerdem davon aus, dass verschiedene vulkanische Quellen die beiden Wellen immer wieder lostreten.

Nature 10.1038/nature22339, 2017

MEDIZIN CANNABIS HÄLT ALTE MÄUSE FIT

► Tetrahydrocannabinol (THC) – der berauschende Inhaltsstoff der Hanfpflanze – wirkt bei älteren Nagern dem altersbedingten kognitiven Abbau entgegen. Forscher um Andreas Zimmer von der Universität Bonn verabreichten 2, 12 und 18 Monate alten Mäusen über 28 Tage hinweg regelmäßig eine niedrige Dosis THC. Im Anschluss testeten sie das Erinnerungsvermögen und

das Lernverhalten der Tiere und verglichen die Ergebnisse mit denen einer Kontrollgruppe, die keine Droge bekommen hatte.

Während die kognitiven Fähigkeiten der jungen Nager unter der Einnahme von THC litten, konnten sich die anderen Tiere durch das Rauschmittel in den Tests überraschenderweise verbessern: Obwohl sie eigentlich schlechter hätten abschneiden müssen, konnten sie auf einmal wieder mit unbehandelten jungen Artgenossen mithalten. Das zeigte sich auch auf biologischer Ebene. So

entdeckten Zimmer und seine Kollegen bei älteren Mäusen ähnliche Genexpressionsmuster im Hippocampus wie bei jungen Tieren, die keine Drogen erhalten hatten. Der Hippocampus spielt bei Gedächtnisprozessen eine wichtige Rolle.

Aber warum wirkt THC je nach Alter so unterschiedlich? Eine abschließende Erklärung für dieses Phänomen haben die Forscher noch nicht. Sie fanden jedoch Hinweise darauf, dass die Droge bei den älteren Nagern epigenetische Veränderungen

hervorrufen, die sich günstig auf Lernen und Gedächtnis auswirken. Früheren Untersuchungen zufolge verändert sich im Alter zudem offenbar das körpereigene Cannabinoid-System, an dessen Rezeptoren THC andockt. Zum genauen Mechanismus sind allerdings noch viele Fragen offen. Ebenso warnen Experten davor, die Ergebnisse voreilig auf den Menschen zu übertragen. Erst müssten nachfolgende Experimente zeigen, ob dort ähnliche Effekte zu beobachten sind.

Nat. Med. 10.1038/nm.4311, 2017

ANTHROPOLOGIE HOMO NALEDI JÜNGER ALS GEDACHT

► Paläoanthropologen haben in einer Höhle in Südafrika weitere Knochen von *Homo naledi* gefunden, darunter einen gut erhaltenen Schädel der mysteriösen Menschenart. Gleichzeitig ist einem Wissenschaftlerteam die lang erwartete Datierung von Fossilien gelungen, deren Entdeckung bereits vor einigen Jahren für großes Aufsehen gesorgt hatte. Demnach könnte *H. naledi* noch vor rund 300 000 Jahren gelebt haben – eine große Überraschung, denn bisher gingen Forscher davon aus, dass die rätselhafte Spezies viel früher ausstarb.

Ein Team um Lee Berger von der University of the Witwatersrand in Johannesburg hatte Überreste von *H. naledi* 2013 in der Rising-Star-Höhle in Afrika entdeckt. Die Forscher förderten damals etwa 1500 Knochenstücke zu Tage, die sie mindestens 15 Individuen zuordneten. Die Anatomie des Naledi-Menschen spricht dafür, dass er gut zu Fuß war, aber auch gut klettern konnte. Sein Gehirn hatte allerdings nur die Größe einer Orange und war damit deutlich kleiner als das von anderen bekannten Vertretern der Gattung *Homo*. Die Experten vermuten, dass der letzte gemeinsame Vorfahr von *H. naledi* und *H. sapiens* vor mindestens zwei Millionen Jahren lebte.

Nun hat eine Forschergruppe, zu der auch Berger gehört, mit Hilfe sechs verschiedener Datierungsmethoden das Alter der Funde abgeschätzt. Unter anderem verglich das Team das Verhältnis von radioaktiven



Dieser neu entdeckte Schädel zählt zu den am besten erhaltenen Fossilien von *Homo naledi*.

JOHN HAWKS / UNIVERSITY OF THE WITWATERSRAND

Uran- zu Thoriumatomen in Tropfsteinsedimenten sowie in vier *H.-naledi*-Zahnproben. Die Ergebnisse grenzen das Alter der Funde auf 226 000 bis 335 000 Jahre ein, schreiben die Wissenschaftler. Demnach könnte die Menschenart mit dem *Homo sapiens* in Kontakt gekommen sein, der sich zu jener Zeit in Afrika ausbreitete.

Ebenso spektakulär ist der Fund von *H.-naledi*-Fossilien in einer bisher unentdeckten Kammer des Rising-Star-Höhlsystems. Ein Team um John Hawks von der University of Wisconsin in Madison barg dort die Überreste von drei Individuen, darunter die eines Kindes. Die Existenz dieser zweiten Kammer stärkt aus Sicht der Forscher die These, dass *H. naledi* seine Toten gezielt an schwer zugänglichen Orten deponierte – eine Form der Bestattung, die man bislang nur weiterentwickelten Menschenarten zuschrieb.

eLife 10.7554/eLife.24234, 2017



PURDUE UNIVERSITY IMAGE / TREVOR MAHLMANN

Der Kopf der »Bologneser Tränen« hält selbst Hammerschlägen stand. Die Glastropfen haben allerdings eine Schwachstelle: Kneift man mit einer Zange ihren langen Schwanz ab, zerspringt das Glas explosionsartig.

PHYSIK DAS GEHEIMNIS DER BOLOGNESER TRÄNEN

Seit dem 17. Jahrhundert sind Materialforscher fasziniert von den so genannten Bologneser Tränen: Sie entstehen, wenn geschmolzenes Glas aus etwa 20 Zentimeter Höhe in ein Wasserbad tropft und dabei von außen nach innen erstarrt. Der Kopf der kaulquappenförmigen Glastropfen wird dadurch so hart, dass er

Schläge mit einem Hammer übersteht. Knickt man hingegen den dünnen Schwanz der Gebilde mit einer Zange ab, zersplittert der ganze Glaskörper in ein feines Pulver.

Bereits 1994 präsentierten M. Munawar Chaudhri und Srinivasan Chandrasekar von der University of Cambridge eine Erklärung für dieses sonderbare Verhalten: Die Oberfläche der Tropfen ist beim Erstarren stark komprimiert worden, weist also eine hohe Druckfestigkeit auf. Das Innere hingegen

steht unter großer mechanischer Spannung. Sie entlädt sich schlagartig, wenn der Schwanz abbricht – binnen Mikrosekunden bilden sich lang gezogene Spalte im Glas, die sich ins Innere des Kopfs ausbreiten und auch ihn splintern lassen.

Nun hat ein Team um Chaudhri und Chandrasekar die Druckverteilung im Körper der Bologneser Tränen sehr detailliert vermessen. Die Forscher tauchten dazu vier der Tränen in eine durchsichtige Flüssigkeit und durchleuchteten die Körper entlang der Längsachse mit rötlichem Licht einer bestimmten Wellenlänge. Anhand der Änderung der Polarisation des Lichts bei der Reflexion im Tropfen konnten die Physiker rekonstruieren, wie stark die Träne an einem bestimmten Punkt unter Spannung steht.

Demnach ist der Kopf der Tränen noch härter als bislang gedacht. Die Druckfestigkeit an seiner Oberfläche beträgt bis zu 700 Megapascal, was fast dem 7000-Fachen des Atmosphärendrucks entspricht. Das Glas dürfte damit nicht nur einen Hammerschlag überstehen. Man könnte den Tränenkopf auch zwischen zwei Aufspannplatten legen und diese mit einem Gewicht von 1500 Kilogramm zusammendrücken. Die extrem harte Schale ist jedoch auch sehr dünn: Sie macht gerade einmal zehn Prozent des Kopfdurchmessers aus. Darunter liegen bereits die stark gespannten Glasschichten, die äußerst leicht splintern.

Appl. Phys. Lett. 10.1063/1.4971339, 2016

KOGNITIONS- FORSCHUNG ANGEBORENE EINORDNUNG

Menschen können eine enorme Anzahl von Farbschattierungen unterscheiden, sie tendieren aber überall auf der Erde dazu, diese Vielfalt in verblüffend ähnliche Schubladen einzusortieren. Das hat beispielsweise die World Color Survey gezeigt, der zufolge Menschen verschiedenster Kulturen und Muttersprachen 320 Nuancen des Farbspektrums mit großer Übereinstimmung in weitgehend deckungsgleichen Kategorien wie »Grün«, »Rot«, »Gelb«, »Blau« oder »Violett« einteilen.

Über die Ursache dieser Gemeinsamkeit diskutieren Experten seit Langem: Wird die Farbwahrnehmung durch kulturelle und sprachliche Normen geprägt oder durch den Wahrnehmungsapparat des Menschen?

Ein Team von Psychologen und Kognitionswissenschaftlern um Anna Franklin von der University of Sussex präsentiert nun die Ergebnisse einer Studie, die für eine biologische Ursache der Farbkategorisierung sprechen. Die Wissenschaftler haben 179 Kindern im Alter von vier bis sechs Monaten Tafeln mit den Farbschattierungen aus der World Color Survey präsentiert.

Zunächst wurden die Säuglinge an einen bestimmten Farbton gewöhnt, indem sie die entsprechende Tafel eine Zeit lang gezeigt bekamen. Anschlie-

End tauschten die Kognitionsforscher die Tafel mit der einen abweichenden Nuance aus.

Sofern ein Baby längere Zeit interessiert auf die neue Tafel blickte, werteten die Wissenschaftler das als Indiz dafür, dass das Kind diese als Veränderung wahrnahm, den Farbton also einer anderen Kategorie zuordnete. Reagierte es

hingegen nicht in besonderem Maß auf den Wechsel, nahm das Team an, der Säugling würde die Nuance nicht als separate Farbe erkennen.

Tatsächlich ordneten die kleinen Probanden die 14 getesteten Nuancen fünf eindeutigen Kategorien zu – und diese waren nahezu deckungsgleich mit den Kategorien, die

Erwachsene als Rot, Gelb, Grün, Blau und Violett bezeichnen würden. Babys folgen damit dem Schubladen-Schema, das sich in der globalen World Color Survey abzeichnete.

Den Forschern fiel zudem ein Zusammenhang mit der Aktivität in zwei wichtigen neuronalen Verbindungen zwischen Augen und Gehirn auf,

die für frühe Stadien der Farbverarbeitung zuständig sind. Möglicherweise prägen diese Nervenbahnen also schon bei Säuglingen die Farbwahrnehmung und geben die Grenzen jener Kategorien vor, die Kinder erst Jahre später sprachlich benennen können.

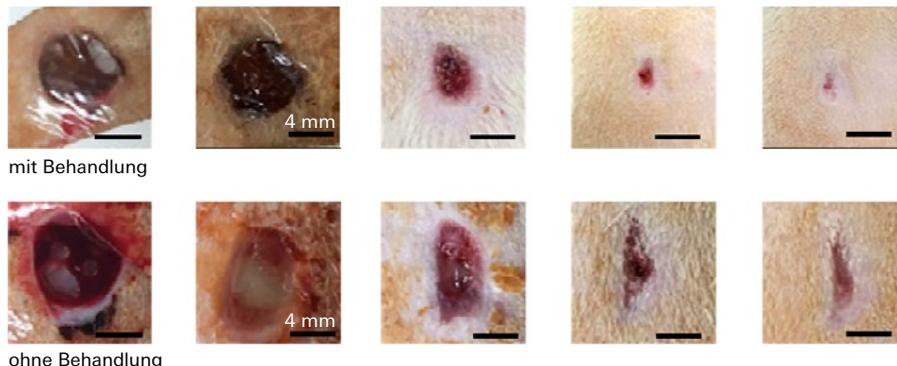
Proc. Nat. Acad. Sci. 10.1073/pnas.1612881114, 2017

MEDIZIN WUNDKLEBER VERHINDERT NARBEN

Wissenschaftler um Hyung Joon Cha von der Pohang University of Science and Technology (Südkorea) haben einen speziellen Gewebekleber entwickelt, der auf einem Muschel-Adhäsionsprotein (mussel adhesive protein, MAP) basiert. Er könnte dabei helfen, Wunden schneller und narbenfrei verheilen zu lassen. Der Eiweißstoff, den Meeresmuscheln absondern, haftet auf diversen Oberflächen – auch unter

Wasser – und ist für lebendes Gewebe gut verträglich. In etwas modifizierter Form kann er Wunden zusammenhalten, deren Heilung beschleunigen und dabei einer Vernarbung entgegenwirken, wie die Forscher berichten.

Wird die Haut tief verletzt, bilden sich während des Heilungsprozesses oft Narben, weil sich die Kollagenfasern des neu entstehenden Bindegewebes unsystematisch anordnen, statt ein regelmäßiges Geflecht zu bilden. Um das zu verhindern, haben die Forscher ein Hydrogel entwickelt – ein Wasser aufnehmendes Polymer –, das auf MAP basiert und die Wunde wie ein Kleber verschließt. Cha und seine Kollegen fügten dem MAP einen Molekülteil hinzu, der an Kollagen bindet und von einem Rezeptortyp auf Blutplättchen stammt. Das Hydrogel klebt die Wunde daher nicht nur zusammen, sondern sein Polymernetzwerk dirigiert die Kollagenfasern auch so, dass sie sich geordneter zusammenlagern.



Mit dem Muschel-Kleber (obere Reihe) verheilte eine Wunde bei Ratten schneller als ohne (untere Reihe). Die Bilder decken einen Zeitraum von 14 Tagen ab.

Den Kleber testete das Team bei drei Ratten. Wurden ihre Hautverletzungen mit dem Hydrogel behandelt, heilte die Wunde besser. Sie schloss sich rascher, neue Blutgefäße wuchsen schneller ein, und die Kollagensynthese nahm zu. Nach elf Tagen waren die Wunden der mit dem Hydrogel behandelten Tiere praktisch vollständig geschlossen, die von Kontrolltieren nur zu rund 80 Prozent. Zudem unterband der Wundkleber die Narbenbildung: Nach 28 Tagen war bei den behandelten Nagern beinahe keine Spur der Verletzung mehr zu sehen, bei den anderen Tieren hingegen ein wulstiger Narbensaum. Nach dem Auftragen des Wundklebers bringe das neu entstehende Gewebe sogar Talgdrüsen hervor, die in Narbengewebe nicht vorkämen, schreiben die Forscher. Als Nächstes wollen sie ihren Kleber an Schweinen testen, da deren Haut der menschlichen mehr ähnelt.

Biomaterials 134, S. 154–165, 2017



ASTROPHYSIK SCHWARZE LÖCHER ALS STERNZERSTÖRER

Kommt ein Stern einem extrem massereichen Schwarzen Loch zu nahe, reißt dieses ihn in Stücke und verschlingt ihn. Mit neuen Teleskopsystemen lässt sich die stellare Katastrophe bis in Details hinein studieren.



S. Bradley Cenko (links) forscht als Astrophysiker für die Swift-Mission am NASA Goddard Space Flight Center. **Neil Gehrels** leitete dort bis zu seinem Tod im Februar 2017 das Astroparticle Physics

Laboratory; er war leitender Forscher der Swift-Mission sowie des Wide-Field Infrared Survey Telescope und des Fermi Gamma-ray Space Telescope.

Fast jede große Galaxie, so auch unsere Milchstraße, verbirgt in ihrem Zentrum ein kosmisches Rätsel: ein supermassereiches Schwarzes Loch. Das bizarre Himmelsobjekt enthält die millionen- bis milliardenfache Masse der Sonne in einem Raumgebiet, das kleiner ist als unser Sonnensystem. Entsprechend gewaltige Gravitationskräfte übt es auf seine Umgebung aus. Astronomen möchten Wachstum und Verhalten dieser Objekte erforschen, um die Entstehung und Entwicklung der sie umgebenden Galaxien besser zu verstehen.

Da Schwarze Löcher kein Licht aussenden, bleiben sie normalerweise unsichtbar. Nur wenn sie Materie verschlingen, machen sie sich bemerkbar, aber das geschieht überraschend selten. Gas, Staub und Sterne wirbeln zumeist auf festen Bahnen um sie herum und werden nicht aufgesogen. Erst wenn doch einmal größere Materiemengen hineinstürzen, wird ihr unstillbarer Hunger von Weitem sichtbar.

Seit 50 Jahren beobachten Forscher vor allem einen Typ gefräßiger Schwarzer Löcher: die 1963 von dem Astronomen Maarten Schmidt entdeckten Quasare. Bei diesem Himmelsphänomen, dem wohl spektakulärsten überhaupt, handelt es sich um den aktiven Kern einer Galaxie, der heller leuchtet als Milliarden Sonnen. Vermutlich ist das nur möglich, weil riesige Gas- und Staubwolken hunderte oder tausende Millionen Jahre lang spiralförmig auf ein supermassereiches Schwarzes Loch zustürzen und dabei so stark

komprimiert und erhitzt werden, dass sie lange Zeit intensiver leuchten als jedes andere Objekt im Universum.

Leider sind Quasare relativ selten und zudem sehr weit von uns entfernt. Da sie nur während eines Bruchteils der Lebensdauer des in ihrem Zentrum verborgenen Schwarzen Lochs strahlen, geben sie wenig Aufschluss über dessen gesamte Entwicklung. Zwar lässt sich die Masse Schwarzer Löcher bestimmen, indem man die Geschwindigkeit eng um sie kreisender Sterne misst, aber das gelingt nur, wenn sie nahe genug liegen – innerhalb der Milchstraße oder in einer Nachbargalaxie –, um mit unseren Teleskopen einzelne Sterne auflösen zu können.

Schon 1988 schlug der britische Astronom Martin Rees eine weitere Untersuchungsmethode vor, die seit Kurzem Früchte zu tragen beginnt. Statt die Strahlung von Quasaren oder die Geschwindigkeit eng kreisender Sterne zu beobachten, könnte man nach kurzen, hellen Lichtblitzen in der Nähe galaktischer Zentren suchen. Sie treten auf, wenn ein supermassereiches Schwarzes Loch einen Stern verschlingt, und werden Tidal Disruption Events (TDEs; zu Deutsch: gezeitenbedingte Zerstörungsereignisse) genannt. Da sie nicht Jahrtausende dauern, sondern nur einige Monate, lässt sich die Sternzerstörung von Anfang bis Ende verfolgen. Sie sind sehr leuchtstark und damit selbst in fernen Galaxien gut zu beobachten.

Wie enorme Anziehungskräfte einen Stern zerfetzen

TDEs haben im Prinzip die gleiche Ursache wie Ebbe und Flut. Für die irdischen Gezeiten ist größtenteils der Mond verantwortlich: Seine Gravitationsanziehung ist auf der ihm näheren Seite der Erdkugel größer als auf der abgewandten, und diese Ungleichheit wirkt als Gezeitenkraft. Sie erzeugt auf beiden Seiten der Erde je einen lokalen Anstieg des Meeresspiegels, den wir als Flut erleben. Wenn allerdings ein Stern in die Fänge eines supermassereichen Schwarzen Lochs gerät, können ihn die extremen Unterschiede buchstäblich in Fetzen reißen.

Die Details hängen dabei von der Größe beider Himmelskörper ab. Ein kleines und dichtes Objekt, etwa ein Weißer Zwerg, widersteht solchen Kräften viel besser als ein gewöhnlicher Stern von der Art unserer Sonne; auch eine Bowlingkugel lässt sich schwerer zerreißen als Zuckerwatte. Die allergrößten, Milliarden Sonnenmassen entsprechenden Schwarzen Löcher erzeugen überhaupt keine TDEs: Sie verschlingen den Stern, bevor die Gezeitenkraft groß genug wird. Hingegen zerfetzen die von einem Schwarzen Loch mit Millionen Sonnenmassen ausgeübten Kräfte jeden Stern, der sich auf weniger als 50 Millionen Kilometer nähert. Das ist etwa der Abstand von Sonne zu Merkur.

Der Zerfall des Sterns ist erst der Anfang eines spektakulären Feuerwerks. Die Bruchstücke verlassen allmählich die ursprünglich vom Stern beschriebene Bahn. Ungefähr die Hälfte des Materials bildet lange Filamente, die sich vom Schwarzen Loch entfernen, während die andere Hälfte als Akkretionsscheibe zu kreisen beginnt – ein spiralförmiges Gebilde, dessen Innerstes langsam vom Schwarzen Loch aufgesogen wird. Dieses Material erreicht dabei fast Lichtgeschwindigkeit und beginnt zu leuchten, da Gravita-

AUF EINEN BLICK ZERRISSEN VON GEZEITENKRÄFTEN

- 1 In den Zentren der meisten Galaxien lauern supermassereiche Schwarze Löcher. Ihr intensives Schwerfeld übt auf jedes Objekt, das ihnen zu nahe kommt, zerstörerische Kräfte aus.
- 2 Aufwändige Himmelsdurchmusterungen mit Weitwinkelteleskopen spüren die charakteristische Strahlung auf, die beim Auseinanderbrechen der fernen Objekte entsteht.
- 3 Die so gewonnenen Daten geben Aufschluss über das noch immer rätselhafte Verhalten Schwarzer Löcher und ihren Einfluss auf die sie umgebenden Galaxien.

tion und Reibungskräfte es komprimieren und auf nahezu 250 000 Grad Celsius erhitzen. Einige Wochen oder Monate lang überstrahlt dann ein zuvor unsichtbares Schwarzes Loch sämtliche Sterne seiner Galaxie.

Selten und schwierig nachzuweisen

Obwohl Theoretiker das Phänomen schon vor Jahrzehnten voraussagten, wurden solche Sternzertrümmerungen erst um das Jahr 2000 entdeckt, denn sie sind sehr selten: Schätzungsweise treten sie in einer Galaxie von der Größe der Milchstraße nur einmal in 100 000 Jahren auf. Außer-

dem lassen sie sich nur schwer beobachten. Laut einfachen theoretischen Modellen sollte die Akkretionsscheibe vor allem im weichen Röntgen- oder kurzwelligen Ultraviolettbereich strahlen, doch diese Wellenlängen sind für irdische Teleskope wegen der Störung durch interstellaren Staub und durch die Erdatmosphäre schlecht zugänglich.

Denselben Modellen zufolge können Astronomen aus einem TDE ziemlich genau auf die Masse des Schwarzen Lochs schließen, welches das Spektakel verursacht. Man misst einfach, wie lange es dauert, bis das TDE seine maximale Helligkeit erreicht, denn das gibt an, wie schnell sich

Ein Quasar – hier künstlerisch dargestellt – entsteht, wenn ein supermassereiches Schwarzes Loch mit seiner gewaltigen Schwerkraft allmählich die rotierende Scheibe aus Gas und Staub aufzehrt, von der es umgeben ist. Besseren Aufschluss über die Eigenschaften solcher Schwarzen Löcher gibt die Beobachtung der Strahlung, die bei der raschen Zerstörung ganzer Sterne durch riesige Gezeitenkräfte frei wird.



MASA / JPL/CALTECH

die Akkretionsscheibe bildet und dem Schwarzen Loch Material zuführt. Wegen ihrer enormen Helligkeit geben die TDEs wie kein anderes Phänomen Auskunft über die unterschiedliche Masse superschwerer Schwarzer Löcher.

Die ersten TDE-Kandidaten wurden in den Daten des Röntgensatelliten ROSAT und des Ultraviolett-Weltraumteleskops Galaxy Evolution Explorer aufgespürt. Sie machten sich als wochen- bis monatelange Strahlungsausbrüche im Zentrum zuvor unauffälliger Galaxien bemerkbar. Die Entdeckungen etablierten ein völlig neues Forschungsgebiet. Allerdings waren die Astronomen zunächst auf alte Daten angewiesen und konnten das Phänomen nicht in Echtzeit und auch nicht bei vielen Wellenlängen studieren. Um ein TDE in Aktion zu erwischen, mussten die Forscher entweder großes Glück haben oder kontinuierlich riesige Himmelsregionen beobachten.

Glücklicherweise sind in den letzten Jahren weiträumige Himmelsdurchmusterungen durch die Fortschritte von Datenverarbeitung und Sensorik tatsächlich möglich geworden. Eine Hochleistungskamera vermag heute einen mehr als ein Quadratwinkelgrad großen Himmelsausschnitt mit einer einzigen Aufnahme zu erfassen. Durch wiederholtes Durchmustern großer Himmelsbereiche und digitalen Vergleich der Aufnahmen lassen sich selbst schwache und vorübergehende Phänomene erkennen. Die dazu genutzten neuen Missionen heißen Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS), Palomar Transient Factory (PTF) und All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN). Sie sollten ursprünglich Supernovae und Asteroiden identifizieren, leisten aber noch viel mehr. Da sie Nacht für Nacht das Licht von Millionen Galaxien einfangen, spüren sie auch die seltenen Sternzertrümmerungen auf.

Überraschende Details einer Sternvernichtung

Kurz nachdem Pan-STARRS die Arbeit aufgenommen hatte, entdeckte ein Team um die Astronomin Suvi Gezari 2011 ein PS1-10jh genanntes TDE, das bei einem rund zwei Millionen Sonnenmassen schweren Schwarzen Loch in einer 2,7 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie stattfand. Da dieses TDE kurz nach dem Sammeln der Daten auffiel, konnte das Team zum ersten Mal die weitere Entwicklung im sichtbaren und UV-Bereich sozusagen live verfolgen. Das Ergebnis verblüffte die Forscher.

Der sorgfältigen Spektralanalyse zufolge schien dieses TDE viel zu wenig Wärme zu erzeugen. Mit rund 30 000 Grad Celsius hatte es nur einen Bruchteil der Hitze, welche die gängigen Modelle für Akkretionsscheiben vorschrieben. Außerdem verblasste PS1-10jh nicht binnen Wochen durch Abkühlung und Zerstreuung seiner Akkretionsscheibe, sondern behielt nach seiner Entdeckung viele Monate lang eine konstante Temperatur. Besonders seltsam war, dass Pan-STARRS im Nachleuchten Anzeichen von ionisiertem Helium entdeckte – was eigentlich nur bei Temperaturen von mehr als 100 000 Grad geschehen darf. Während das TDE anscheinend viel Helium enthielt, fehlte Wasserstoff, immerhin das häufigste Element im Universum und der Hauptbestandteil von Sternen. Die Theoretiker standen vor einem Rätsel.

Ein gewaltsames Ende

Obwohl supermassereiche Schwarze Löcher selbst nicht leuchten, verursachen sie die spektakulärsten Phänomene im Universum, darunter so genannte gezeitenbedingte Zerstörungereignisse oder TDEs (Tidal Disruption Events). Ein Stern, der einem dieser kosmischen Giganten zu nahe kommt, wird durch intensive Gezeitenkräfte zerfetzt. Ein Teil der Bruchstücke strömt als Gas auf das Schwarze Loch zu, wird unterwegs komprimiert und beginnt zu strahlen. Ein anderer Teil entweicht ins All.

Der Anfang ...

Ein TDE beginnt, sobald ein supermassereiches Schwarzes Loch die ihm zugewandte Seite eines vorüberziehenden Sterns stärker anzieht als die gegenüberliegende Seite. Die Wirkung dieser Gezeitenkräfte hängt von der Masse des Schwarzen Lochs und der Dichte des Sterns ab. Hier nähert sich ein sonnenähnlicher Stern einem Schwarzen Loch mit einer Million Sonnenmassen.



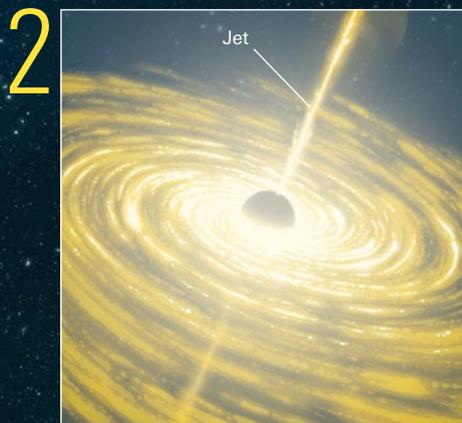
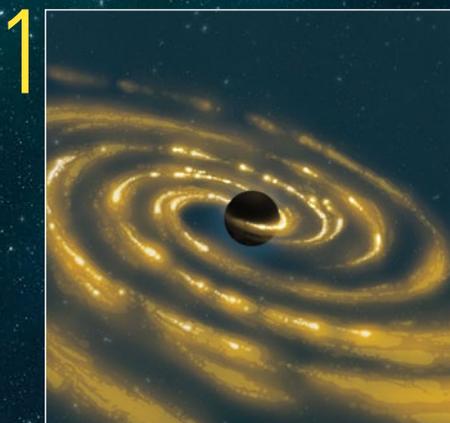
... vom Ende

Die Gezeitenkräfte nehmen zu, je näher der Stern dem Schwarzen Loch kommt, und zerreißt ihn schließlich in bogenförmige Gasfilamente. Sie werden zur Hälfte ins All davongeschleudert. Der Rest wirbelt auf immer engeren Bahnen spiralförmig auf das Schwarze Loch zu und bildet unterwegs eine heiße Akkretionsscheibe, an deren Strahlung die Astronomen erkennen, dass es sich um ein TDE handelt.

Ein einmaliges Schauspiel

Ein TDE ist das einzige Ereignis, bei dem Astronomen verfolgen können, wie ein Schwarzes Loch aktiv wird, Material verzehrt und wieder zum Ruhezustand zurückkehrt. Aus der Zeit, die eine Akkretionsscheibe braucht, sich zu bilden (1), maximale Helligkeit zu erreichen (2) und zu verlöschen (3), lassen sich die Größe des

zerstörten Sterns sowie Masse und Drehimpuls des Schwarzen Lochs erschließen. Außerdem können die Forscher Stoßwellen in der Scheibe sowie die Entstehung relativistischer Jets verfolgen – Teilchenströme, die fast mit Lichtgeschwindigkeit von den Polen des Schwarzen Lochs ausgehen.



MATTHEW TWOMBLY / SCIENCE/AMERICAN APRIIL 2017

Um den fehlenden Wasserstoff zu erklären, nahm Geza-
ris Team an, der zerstörte Stern habe seinen dicken Was-
serstoffmantel schon zuvor eingebüßt – vielleicht bei einer
früheren Wechselwirkung mit dem Schwarzen Loch –
und nur seinen heliumreichen Kern behalten, mit dem er
dann die beobachtete Akkretionsscheibe speiste. Doch
wie erklärte sich das paradoxe thermische Verhalten von
PS1-10jh, also seine überraschend niedrige Temperatur
und im Gegensatz dazu der nur bei viel höherer Hitze
ionisierbare Heliumüberschuss? Andere Theoretiker haben
darum vermutet, die Astronomen hätten gar nicht die
Akkretionsscheibe selbst beobachtet, sondern stattdessen
einen viel weiter vom Schwarzen Loch entfernten Gas-
schleier, der die intensive Strahlung der Scheibe absorbiert
und bei tieferen Temperaturen wieder abgab. Ein sol-
cher Schleier hätte den zusätzlichen Vorteil, dass er das
scheinbare Fehlen von Wasserstoff zwanglos erklärt. Bei
passender Temperatur und ziemlich hoher Dichte verhüllt
er alle Hinweise auf dieses Element.



Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Der Haken ist nur: Ein dichter Gasschleier wäre bei dem
erforderlichen Abstand zum Schwarzen Loch nicht stabil.
Das Gas würde entweder ins Schwarze Loch stürzen oder
sich ins All verflüchtigen. Der unklare Ursprung dieses
Materials sorgt noch immer für rege Diskussionen. Grob
gesagt gibt es zwei Möglichkeiten, die beide mit der
Dynamik des gefräßigen Schwarzen Lochs zu tun haben.
Während die Überbleibsel eines zerstörten Sterns um
dieses herumwirbeln und eine wachsende Akkretions-
scheibe bilden, könnten von der Scheibe ausgehende
Stoßwellen den sofortigen Absturz weiter draußen kreis-
enden Materials verhindern und damit einen halbwegs
stabilen Schleier erzeugen. Laut einer anderen Erklärung
wälzt die Akkretionsscheibe kurz nach ihrer Entstehung so
viel Material nach innen, dass das Schwarze Loch davon
quasi überfordert wird und einen Teil wieder weit über die
Scheibe hinaus wegschleudert. Wie die Rätsel um PS1-
10jh und andere bald danach entdeckte TDEs verdeutlichen,
sind Sternzerstörungen unerwartet komplexe Phänomene.
Doch die größte Überraschung stand noch bevor.

In den frühen Morgenstunden des 28. März 2011 wurden
Astronomen in aller Welt durch automatische Nachrichten
auf ihren Mobiltelefonen alarmiert. Der Swift-Satellit hatte
soeben tief im All einen hochenergetischen Strahlungsblitz
entdeckt. Swift ist ein Weltraumteleskop der NASA mit
italienischer und britischer Beteiligung, das vor allem auf
Gammastrahlenblitze (abgekürzt GRBs für gamma-ray

bursts) spezialisiert ist, heftige Sternexplosionen, die zu
den strahlungsintensivsten Kurzzeitereignissen im Univer-
sum zählen. Sobald ein Strom energiereicher Gamma-
strahlen die Swift-Sensoren erreicht, reagiert das Teleskop
sofort. Es beobachtet die Quelle im optischen und Rönt-
genbereich und alarmiert zugleich die Erde. Hastig richten
daraufhin die Astronomen die größten Teleskope der Welt
auf das rasch schwindende Nachleuchten des Gammablitzes.
Seit seinem Start 2004 hat Swift auf diese Art mehr
als 1000 GRBs entdeckt. Das Ereignis vom 28. März 2011,
später als Swift J1644+57 katalogisiert, sollte sich aller-
dings als etwas noch nie Gesehenes erweisen.

Swift sorgt mit einem Strahlungsblitz für Sensationen

Wie ihr Name sagt, dauern Gammablitz nur sehr kurz,
zwischen Sekundenbruchteilen und wenigen Minuten. Als
wir an jenem frühen März Morgen unsere Teleskope auf
Swift J1644+57 richteten, waren wir auf das übliche kurze
Nachglühen eines GRBs gefasst. Stattdessen beobachte-
ten wir starke, unregelmäßige Ausbrüche, die einen Tag
andauerten, gefolgt von monatelangen, intensiven, lang-
sam nachlassenden Röntgenemissionen. Bald hatten wir
die Quelle in einer 3,8 Milliarden Lichtjahre entfernten
Galaxie im Sternbild Drache geortet. Unser Kollege Joshua
S. Bloom von der University of California in Berkeley mein-
te gleich, wir seien auf ein TDE gestoßen. Er sagte korrekt
voraus, dass wir diese spezielle Gammaquelle exakt im
Zentrum der Galaxie lokalisieren würden – dort, wo ein
supermassereiches Schwarzes Loch Sterne zermalmt.
Aber konnte das sein? Alle früher entdeckten TDEs waren
bei größeren, weniger energiereichen Wellenlängen gefun-
den worden, die von der erwärmten Akkretionsscheibe
eines zeretzten Sterns ausgehen. Hier war alles anders.

Wie kann ein TDE Gammastrahlen erzeugen? Die beste
Antwort, die wir anbieten können, lautet: Schwarze Löcher
haben keine Tischmanieren. Ein Schwarzes Loch frisst das
meiste Gas eines zerstörten Sterns auf und lässt es auf
Nimmerwiedersehen hinter dem Ereignishorizont ver-
schwinden, hinter jener Grenze, der nicht einmal Licht
entkommt. Doch vermutlich rotieren alle Schwarzen
Löcher, und ihr Drehimpuls treibt ein paar Prozent des
Sternmaterials außerhalb des Ereignishorizonts zu den
Polen, wo das Gas fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleu-
nigt wird und in Form gebündelter Teilchenstrahlen davon-
schießt. Unterwegs senden diese energiereichen Jets
Gamma- und Röntgenstrahlen aus. Anscheinend hat der
Jet von Swift J1644+57 zufällig den Swift-Satelliten
getroffen. Das war ein glücklicher Fang. Offenbar leisten
sich nicht alle TDEs solche relativistischen – fast licht-
schnellen – Teilchenemissionen, und diese sind zumeist
nicht direkt auf uns gerichtet.

Dennoch blieb Swift J1644+57 nicht allein. Bis Anfang
2017 fand das Swift-Team zwei weitere TDEs, die Gamma-
Jets aussandten. Diese besonders seltenen und intensiven
Boten sterbender Sterne eröffnen einen neuen Zugang zu
einem der wichtigsten Forschungsgebiete der modernen
Hochenergie-Astrophysik, der Entstehung relativistischer
Teilchenstrahlen.

Im Unterschied zu den viel größeren und dauerhafteren Jets und Akkretionsscheiben der Quasare, die vom lang anhaltenden Sturz gigantischer Gaswolken in ein supermassereiches Schwarzes Loch herrühren, sind TDEs kurze, überschaubare Ereignisse, die sich gut untersuchen lassen. Kein Mensch wird jemals den kompletten Lebenszyklus eines einzelnen Quasars verfolgen können, aber Astronomen haben bereits mehr als 20 TDEs von Anfang bis Ende studiert. In den Details dieser Sternkatastrophen lauern weitere Rätsel. Präzise Messungen der TDE-Strahlungsausbrüche geben nicht nur Auskunft über Schwarze Löcher, sondern zudem über Zusammensetzung und innere Struktur von Sternen, die Milliarden Lichtjahre weit entfernt in Stücke gerissen werden.

Das gilt sogar für mögliche Begleitobjekte, die zusammen mit ihrem Stern zu Grunde gehen. Jedes Aufblitzen im Zentrum einer fernen Galaxie signalisiert vielleicht das Ende eines kompletten Planetensystems. Wie Durchmusterungen unserer Milchstraße ergeben haben, wird fast jeder Stern von Trabanten begleitet. Wahrscheinlich sind auch bei den meisten TDEs ganze Systeme im Spiel. Selbst wenn die Planeten dabei nicht direkt verschlungen werden, können sie in die von einigen TDEs erzeugten relativistischen Jets geraten, die sich über Lichtjahre ins All erstrecken. Jede Spur von Leben auf diesen Welten würde sofort vernichtet. Vielleicht werden wir eines Tages Zeugen einer Sternzerstörung in unserem kosmischen Hinterhof, wenn das vier Millionen Sonnenmassen schwere Schwarze Loch, das im Zentrum der Milchstraße lauert, einen vagabundierenden Stern zerreißt. Der Blitz wäre sehr intensiv, aber unschädlich, denn die Erde liegt in sicherer Entfernung vom galaktischen Zentrum.

Mit noch mächtigeren Durchmusterungen kündigt sich eine neue Ära der TDE-Forschung an. In Chile entsteht das Large Synoptic Survey Telescope (LSST); dieses Acht-Meter-Teleskop, dessen Gesichtsfeld zehn Quadratwinkelgrad abdeckt, soll allein im ersten Jahrzehnt tausende TDEs aufspüren. Das größte Problem wird die Auswertung einer überwältigenden Flut von Daten sein. Geplante Radioobservatorien wie das Square Kilometre Array mit Standorten in Australien und Südafrika eignen sich speziell zur Entdeckung relativistischer Jets – sogar dann, wenn die Teilchenstrahlen nicht genau auf uns gerichtet sind. In naher Zukunft könnte daraus ein TDE-Katalog mit abertausenden Einträgen entstehen, die helles Licht auf das Ende ferner Welten werfen. ◀

QUELLEN

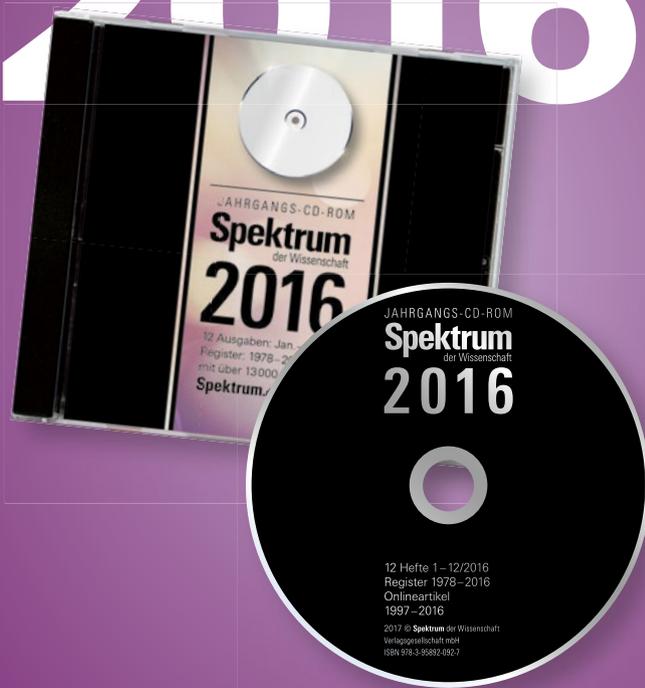
Bloom, J. S. et al.: A Possible Relativistic Jetted Outburst from a Massive Black Hole Fed by a Tidally Disrupted Star. In: *Science* 333, S. 203–206, 2011

Gezari, S. et al.: An Ultraviolet-Optical Flare from the Tidal Disruption of a Helium-Rich Stellar Core. In: *Nature* 485, S. 217–220, 2012

Gezari, S. et al.: PS1-10jh Continues to Follow the Fallback Accretion Rate of a Tidally Disrupted Star. In: *Astrophysical Journal Letters* 815, L5, 2015

Rees, M. J.: Tidal Disruption of Stars by Black Holes of 10^6 – 10^8 Solar Masses in Nearby Galaxies. In: *Nature* 333, S. 523–528, 1988

JAHRGANGS GANGS CD-ROM 2016



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

Tel. 06221 9126-743

**www.spektrum.de/recherche
service@spektrum.de**

INTERVIEW

SCHATTENWURF DES SCHWARZEN LOCHS

Mit dem Event Horizon Telescope haben Astronomen auf der ganzen Welt im April ins Herz der Milchstraße geblickt. Jetzt warten sie sehnsüchtig darauf, die Daten auszuwerten.

» spektrum.de/artikel/1461019

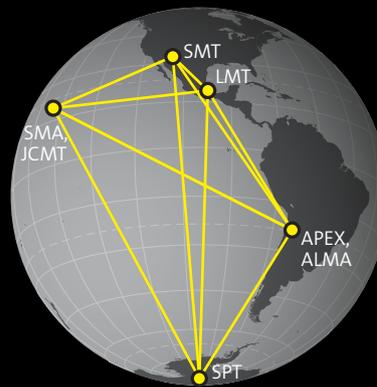
Dank guter Wetterbedingungen konnten die Messungen des galaktischen Zentrums mit dem Event Horizon Telescope (EHT) rasch abgeschlossen werden. Bis ein verwertbares Bild vorliegt, wird es aber wohl noch einige Zeit dauern, vielleicht sogar ein ganzes Jahr. Woran liegt das?

Michael Kramer: Es gibt keine Datenleitung, die diese Informationsmenge speziell vom Südpol effektiv übertra-

gen kann. Die Übermittlung per Funkverbindung würde wegen der begrenzten Bandbreite der Satelliten sehr lange dauern und auch ständig unterbrochen, weil die Satelliten ja nicht geostationär sind. Und man würde die Arbeit aller anderen Forscher am Südpol ziemlich behindern. Deshalb werden die Messergebnisse auf Datenträgern gespeichert und ausgeflogen. Aber die Auswertung und Kalibrierung sorgfältig zu machen, braucht auch seine Zeit.

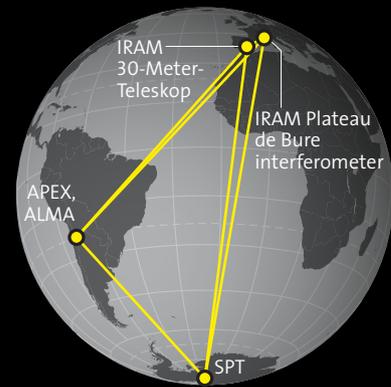
Ein erdballgroßes Teleskop

Mehrere weltweit verteilte Radioteleskope formen zusammen das Event Horizon Telescope. Sie alle liegen an Orten, an denen die irdische Atmosphäre die Signale des Schwarzen Lochs möglichst wenig stören kann. Indem die Astronomen sie gleichzeitig auf ein Ziel ausrichten und die gesammelten Daten miteinander verrechnen, entsteht ein virtuelles Teleskop mit dem Durchmesser der Erde und entsprechend hoher Auflösung – rein rechnerisch gut genug, um einen Bereich des Himmels abbilden zu können, welcher der Größe einer DVD auf dem Mond entspräche.



Vernetzte Instrumente

- Submillimeter Telescope (SMT) in den USA
- Large Millimeter Telescope (LMT) in Mexiko
- Submillimeter Array (SMA) und James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) auf Hawaii



- Atacama Pathfinder Experiment (APEX) und Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) in Chile
- South Pole Telescope (SPT) an der Amundsen-Scott-Südpolstation in der Antarktis
- zwei Teleskope des Institut de Radio-astronomie Millimétrique (IRAM) in Spanien (Pico del Veleta) und Frankreich



Michael Kramer

ist Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn, das auch das Radioteleskop in Effelsberg betreibt. Mit seinen Kollegen Heino Falcke und Luciano Rezzolla versucht er anhand von Modellrechnungen zu verstehen, wie das Abbild des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße vor der Akkretionsscheibe entsteht. Das Projekt der Forscher wird durch den Synergy Grant »BlackHoleCam« des European Research Council gefördert.

Und das Ausfliegen ist erst möglich, wenn dort wieder Frühling ist?

Genau, also bei uns im Herbst. Und selbst wenn wir dann das Bild haben, ist es damit noch nicht getan. Wir wollen ja auch die Physik verstehen, die dahintersteckt. Dazu müssen wir es etwa mit numerischen Modellrechnungen vergleichen. Das ist für mich das Spannende bei diesem Projekt: Um das Puzzle zusammenzufügen, müssen wir alle Teile verstehen und dazu verschiedene Experten zusammenbringen.

Mit manchen Radioteleskopen kann man durch die Wolken hindurchsehen. Bei diesem Projekt waren Radioastronomen aber auf klaren Himmel an allen acht Beobachtungsstandorten angewiesen. Warum?

Sobald die Wellenlänge, bei der wir beobachten, vergleichbar ist mit der Größe der Wassertropfen und Partikel in der Atmosphäre, wird die Strahlung erheblich gedämpft. Das mindert die Messempfindlichkeit. Ab 20 Gigahertz ist man daher schon sehr wetterabhängig, und unsere Beobachtungen mit dem Event Horizon Telescope laufen bei 230 Gigahertz beziehungsweise einer Wellenlänge von 1,3 Millimetern. Da brauchen wir entsprechend gute Bedingungen. Während wir die großen Zentimeterteleskope wie das in Effelsberg hier fast auf Meeresebene betreiben können, muss man für die Submillimeter- oder eben auch schon Millimeterteleskope wie ALMA in Chile oder das Observatorium auf dem Pico del Veleta in Spanien auf einen hohen Berg gehen, so dass man möglichst wenig Wasserdampf über sich hat. Der Südpol selbst liegt fast 3000 Meter hoch, hinzu kommen die tiefen Temperaturen, die den Standort ideal machen.

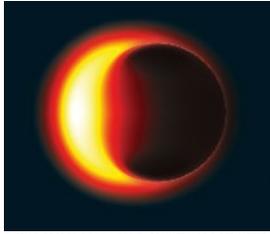
Warum lohnt der Blick ins galaktische Zentrum bei diesen hochfrequenten Radiowellen besonders?

Man erhält so eine bessere Bildauflösung. Denn bei niedrigeren Frequenzen beeinträchtigen zwei Effekte die Messgenauigkeit. Zum einen ergibt sich die tatsächliche Auflösung des aus den einzelnen Teleskopen zusammengesetzten Instruments aus dem Verhältnis von Wellenlänge zu Durchmesser. Letzterer ist maximal ausgereizt, indem wir den Erddurchmesser als größtmöglichen Abstand zwischen Teleskopen auf der Erdoberfläche verwenden. Darüber hinaus kann man nur die Frequenz variieren. Sie richtet sich dann nach dem Winkel, unter dem uns das Schwarze Loch im galaktischen Zentrum bei einem Abstand von 26 000 Lichtjahren erscheint. Das sind 50 Mikrobogensekunden. Um das auflösen zu können, müssen wir mindestens bei einer Frequenz von 230 Gigahertz oder eben einer Wellenlänge von 1,3 Millimetern messen.

Ein anderer Grund, warum wir so hohe Frequenzen brauchen: Das interstellare Medium im galaktischen Zentrum ist sehr turbulent und inhomogen. Daran werden die Radiowellen gestreut. Stellen Sie sich vor, Sie fahren bei Nebel mit dem Auto. Dann sehen Sie um die Scheinwerfer der anderen Autos oder um die Straßenbeleuchtung einen Lichthof. Ebenso erscheint das galaktische Zentrum diffus. Dieser Streueffekt nimmt erst bei hohen Radiofrequenzen ab. Bei 230 Gigahertz verschwindet er zusehends. Erst dann lässt sich die tatsächliche Größe des Schwarzen Lochs aufzeichnen.

Dennoch sehen wir das Schwarze Loch nicht direkt, sondern nur seinen Schattenwurf. Wie kann man sich das vorstellen?

Wenn das heiße Plasma auf der Akkretionsscheibe in das Schwarze Loch fällt, wird Gravitationsenergie freigesetzt



AVERY E. BRODERICK, UNIVERSITY OF WATERLOO & PERIMETER
INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS

Der Schatten eines Schwarzen Lochs

Auf Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie haben Astrophysiker ausgefeilte Modelle für die Vorgänge am Rand eines Schwarzen Lochs entwickelt. Mit den ersten Messungen des Event Horizon Telescope liegen nun Daten vom galaktischen Zentrum vor. Die bei uns sichtbare Form und Größe des Schattenwurfs – links im Bild eine Simulation – hängen im Prinzip allein davon ab, wie schnell es rotiert und wie stark das Licht in seiner Nähe durch die Gravitation abgelenkt wird.

und als Schwarzkörperstrahlung im Radiobereich abgegeben. Vor diesem intensiv leuchtenden Hintergrund wirft das Schwarze Loch einen Schatten.

Wie verzerrt das Schwarze Loch außerdem seine unmittelbare Umgebung auf Grund der starken Gravitation?

Bestimmte Photonenbahnen, die hinter dem Schwarzen Loch vorbeiführen, werden durch das Gravitationsfeld so abgelenkt, dass uns von dort trotzdem Strahlung erreicht. Und auf der einen Seite des Schwarzen Lochs kommt das Plasma entlang der Akkretionsscheibe auf uns zu, auf der anderen bewegt es sich von uns weg.

Diese Orte erscheinen uns aber nicht als Punktquellen, sondern sind ähnlich wie bei einem starken Vergrößerungsglas sichelartig verzerrt. Anhand des Bildes der Akkretionsscheibe und der Form des Schattens, den das Schwarze Loch auf die Akkretionsscheibe wirft, werden wir dann versuchen, auf Masse und Drehimpuls des Schwarzen Lochs zu schließen.

Indem Sie es mit theoretischen Modellen vergleichen?

Ja; dabei ist vielleicht die Akkretionsphysik die große Unbekannte. Davon gibt es sicherlich gute Vorstellungen, aber so ganz genau wissen wir nicht, wie sich das Plasma tatsächlich bewegt. Das hängt von Masse und Spin des Schwarzen Lochs ab, und vielleicht auch von der Geometrie der Raumzeit.

Gibt es noch eine andere Methode, die Eigenschaften des Schwarzen Lochs herauszubekommen?

Dazu suchen wir nach schnell rotierenden, im Radiofrequenzbereich strahlenden Neutronensternen im galaktischen Zentrum. Numerische Rechnungen zeigen, dass die Bahn eines solchen Pulsars mit einer Umlaufperiode von drei Monaten bei jedem Vorbeiflug um das Schwarze Loch messbar gestört würde – zum einen wegen der Wechselwirkung der Bahnebene mit dem Drehimpuls des Schwarzen Lochs. Zum anderen ist das Schwarze Loch auf Grund der Rotation abgeflacht, es besitzt ein so genanntes Quadrupolmoment. Auch so erhält der Pulsar jedes Mal, wenn er am Schwarzen Loch vorbeifliegt, einen kleinen Kick.

Wir brauchen uns also nur die Veränderung der Pulsarbahnbewegungen zwischen zwei Passagen anzusehen; mit jedem Vorbeiflug wird unsere Messung genauer. Daraus können wir dann den Spin wie auch das Quadrupolmoment des Schwarzen Lochs bestimmen.

Warum sind diese beiden Eigenschaften so wichtig?

In der allgemeinen Relativitätstheorie, teilweise aber auch in alternativen Theorien ist ein Schwarzes Loch das einfachste Objekt, das man sich überhaupt vorstellen kann. Wenn es zum Beispiel durch den Kollaps eines Sterns oder durch Vereinigung von zwei Neutronensternen oder zwei anderen Schwarzen Löchern entsteht, geht mit der Abstrahlung von Gravitationswellen jede Eigenschaft der Vorgängerobjekte verloren – bis auf Drehimpuls und Masse. Das besagt das so genannte No-Hair-Theorem. Theoretisch gäbe es noch die Ladung, doch die können wir wahrscheinlich unter astrophysikalischen Umständen nicht gut messen.

Wenn die Theorie stimmt, lassen sich aus Masse und Drehimpuls alle weiteren Eigenschaften des Schwarzen Lochs ableiten, so auch die Art und Weise, wie es sich abflachen muss. Sobald wir diese beiden Größen gemessen haben, lässt sich das Quadrupolmoment des Schwarzen Lochs vorhersagen. Und das wiederum können wir hoffentlich mit Pulsaren auf ein Prozent genau messen – und damit die Theorie überprüfen.

Gibt es schon entsprechende Pulsarbeobachtungen?

Wir suchen derzeit mit jedem Radioteleskop, das uns zur Verfügung steht, nach solchen Objekten im galaktischen Zentrum. Etwa mit dem Observatorium auf dem Pico del Veleta in Spanien, das Teil des EHT ist, aber auch mit dem Teleskop in Effelsberg – das heißt bei unterschiedlichen Frequenzen. Bis auf einen Magnetar in 0,3 Lichtjahren Entfernung vom galaktischen Zentrum haben wir aber noch keine weiteren gefunden; dazu gibt es verschiedene Interpretationen. Ich persönlich denke, dass dieselben Streueffekte, die das Bild vom Schwarzen Loch verschmieren, sich auch auf die Signale von Pulsaren auswirken. Man müsste hier also ebenfalls höhere Frequenzen nutzen. Es wäre gut, wenn wir dazu auch ALMA im Submillimeterbereich verwenden könnten. Testbeobachtungen von uns zeigen, dass dies möglich ist. ◀



Die Fragen stellte **Felicitas Mokler**,
Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

LITERATURTIPP

Psaltis, D., Doeleman, S. S.: Wie vermisst man ein Schwarzes Loch? In: Spektrum Februar 2016, S. 40–47
Astronomen aus dem Projektteam erklären das Prinzip des EHT.

Die Kunst zu überraschen.

Die Schätze des Damien Hirst im FOCUS.

LEBEN

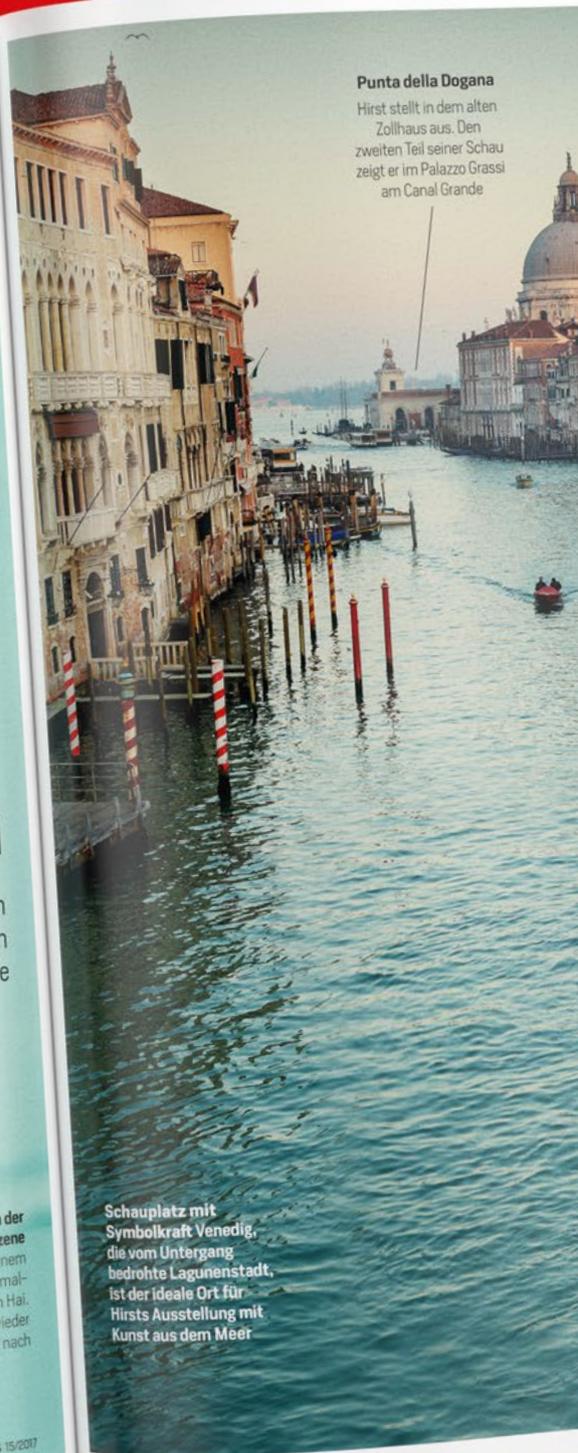


Viva Venezia

Zehn Jahre arbeitete **Damien Hirst** an seinem Wasserprojekt. Jetzt präsentiert er den Kunstschatz in Venedig als Auftakt zur Biennale

Großer Fisch der Kunstszene
Damien Hirst mit seinem berühmten, in Formaldehyd eingelegten Hai. Nun spürt er wieder Meereswesen nach

FOCUS 15/2017



Punta della Dogana
Hirst stellt in dem alten Zollhaus aus. Den zweiten Teil seiner Schau zeigt er im Palazzo Grassi am Canal Grande

Schauplatz mit Symbolkraft
Venedig, die vom Untergang bedrohte Lagunenstadt, ist der ideale Ort für Hirsts Ausstellung mit Kunst aus dem Meer

FOCUS15/2017

Menschen im



NUKLEARMEDIZIN RÜCKSCHLAG FÜR DIE DIAGNOSTIK

Das seltene radioaktive Isotop ^{99m}Tc ermöglicht jährlich Millionen hochgenaue nuklearmedizinische Untersuchungen. Aber die Reaktoren, die es produzieren, werden nach und nach abgeschaltet. Experten schlagen Alarm.

► Jahr für Jahr führen Mediziner weltweit mehr als 30 Millionen bildgebende nuklearmedizinische Untersuchungen durch, bei denen sie den Patienten das Technetiumisotop ^{99m}Tc verabreichen. 99 steht für die Massenzahl des Isotops und »m« für »metastabil« – ^{99m}Tc ist ein angeregter, relativ langlebiger Zustand (ein so genanntes Kernisomer) des Isotops ^{99}Tc . Die radioaktiven Atome helfen, in das Innere des Organismus zu blicken, und zwar mit Hilfe eines Verfahrens namens Einzelphotonen-Emissionscomputertomografie. Es ermöglicht unter anderem, Krebserkrankungen zu erkennen, die Pumpfunktion geschädigter Herzen zu analysieren sowie Gehirne zu durchleuchten, die von einem Schlaganfall in Mitleidenschaft gezogen wurden. Indem die Mediziner ^{99m}Tc etwa an einen Antikörper koppeln, der an Oberflächenstrukturen von Krebszellen bindet, sorgen sie dafür, dass sich das Technetium in Tumoren anreichert. Messen sie anschließend mit Geräten außerhalb des Körpers die Strahlung, die das Isotop abgibt, können sie solche Wucherungen sichtbar machen, ohne den Körper zu öffnen. Abwandlungen der Methode erlauben es, gezielt einzelne Organe zu untersuchen, etwaige Gewebeschädigungen dort offenzulegen und Erkrankungen des Blutgefäßsystems zu diagnostizieren.

Der große Vorteil der Bildgebung mit ^{99m}Tc : Sie ist detailgenauer als andere Methoden. Besonders bewährt sie sich beim Aufspüren von Knochentumoren oder -brüchen sowie beim Erkennen arterieller Verengungen. Zudem geht sie mit einer sehr niedrigen Strahlendosis und entsprechend hoher Anwendungssicherheit einher. Denn das Isotop sendet Gammastrahlung geringer Ionisationsdichte aus, wird zum größten Teil wieder ausgeschieden, und der Rest zerfällt in ^{99}Tc , das seinerseits kaum zusätzliche Strahlenbelastung im Organismus verursacht.

Doch das Verfahren ist gefährdet. Technetium kommt auf der Erde nur äußerst selten vor und muss für medizinische Zwecke künstlich erzeugt werden. Erschwerend wirkt sich aus, dass ^{99m}Tc innerhalb eines Tages nahezu vollständig zerfällt und nicht länger als einige Stunden gelagert werden kann. In der Regel gewinnt man es daher aus der spontanen Umwandlung des Mutternuklids Molybdän-99, das sich wegen seiner Halbwertszeit von 66 Tagen besser transportieren und lagern lässt. Molybdän-99 fällt allerdings weltweit nur in sechs Forschungsreaktoren an, von denen es um den Globus verteilt werden

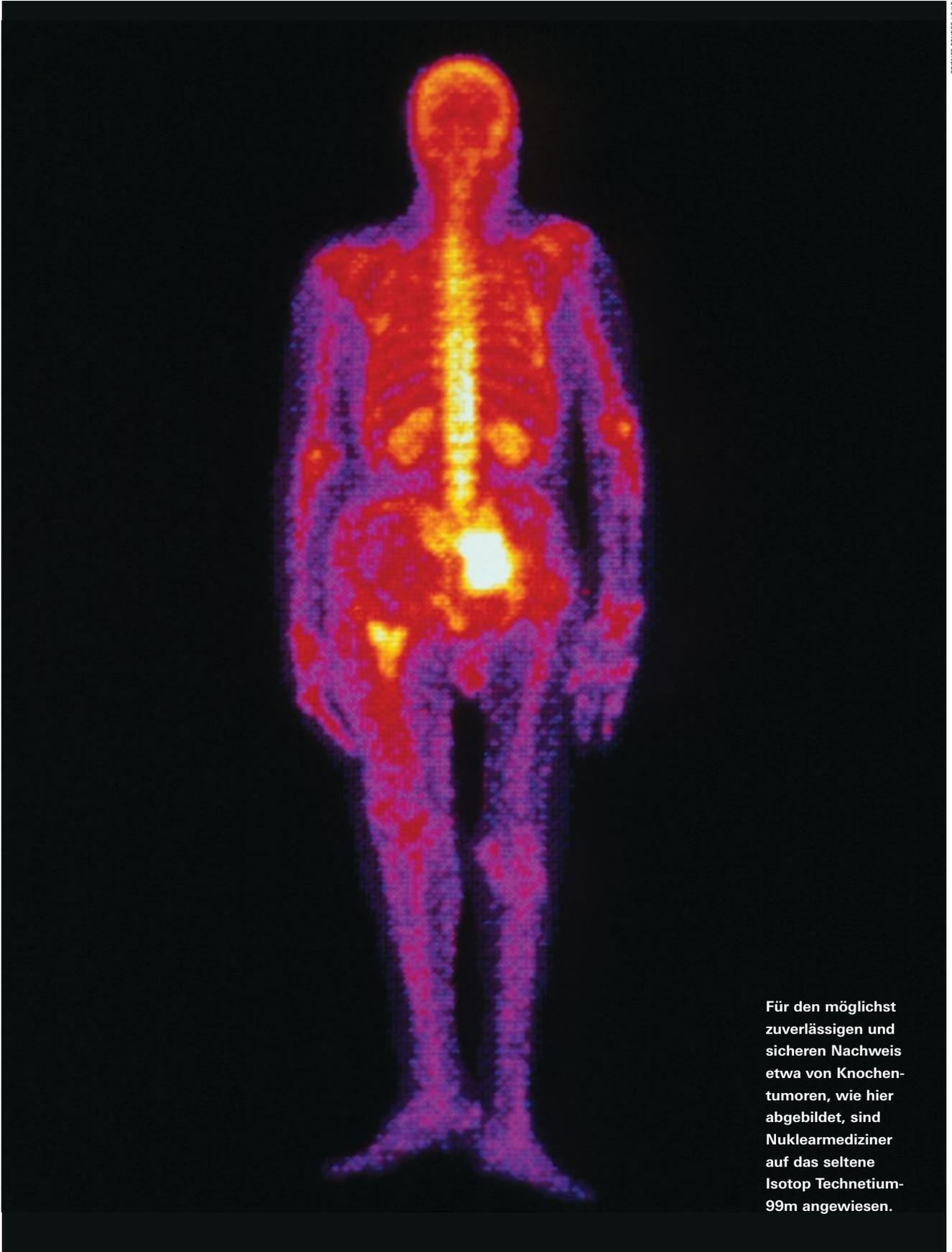
muss. Vier dieser Anlagen sind älter als 50 Jahre und daher zunehmend von Ausfällen bedroht.

Im Oktober 2016 stellte einer jener Reaktoren im kanadischen Chalk River die Produktion von Molybdän-99 ein. Er soll in ein paar Jahren komplett abgeschaltet werden. Bis März 2018 bleibt er in Bereitschaft, falls es zu einem massiven Engpass in der Technetiumversorgung kommt. Weitere zwei Anlagen in Belgien und den Niederlanden, die derzeit die Hälfte der weltweiten Produktion stemmen, sollen innerhalb des kommenden Jahrzehnts den Betrieb einstellen. Neue Einrichtungen zum Herstellen von Molybdän-99 sind zwar geplant, etwa in Garching bei München. Aber bis zu deren Inbetriebnahme kann mehr als ein Jahrzehnt vergehen. Im September 2016 schlugen die National Academies of Sciences, Engineering and Medicine in den USA laut Alarm, indem sie mitteilten, es gebe in naher Zukunft das »beträchtliche« Risiko eines ^{99m}Tc -Engpasses.

Falls es wirklich dazu käme, müssten die Mediziner auf andere nuklearmedizinische Bildgebungsverfahren zurückgreifen – beispielsweise, indem sie auf das Radioisotop Thallium-201 ausweichen. Dies ginge allerdings mit weniger scharfen Bildern und einer höheren Strahlenbelastung der Patienten einher. Und nichtradioaktive Methoden wie die Echokardiografie sind deutlich ungenauer als das ^{99m}Tc -Verfahren. Mediziner befürchten daher einen Rückschritt in der medizinischen Diagnostik.

Bereits 2009 und 2010 mussten Ärzte mit Molybdän-99-Engpässen kämpfen. Damals waren sowohl der kanadische als auch der niederländische Reaktor für längere Zeit außer Betrieb. »Das war für alle Beteiligten ein Weckruf«, sagt Sally Schwarz, Präsidentin der Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. »Diagnostisch wichtige Untersuchungen konnten nicht durchgeführt werden, was zu Lasten der Patienten ging. Wir möchten nicht noch einmal in diese Situation kommen.«

Millionenschwere Suche nach neuem Herstellungsweg
Aufgeschreckt davon, hat die kanadische Regierung ein 45 Millionen Dollar schweres Programm namens ITAP (Isotope Technology Acceleration Program, deutsch: Programm zur Beschleunigung der Isotopentechnologie) gestartet. Dessen Ziel lautet, ^{99m}Tc mit alternativen Methoden herzustellen. Das meistversprechende Projekt innerhalb dieses Programms setzt auf einen kleinen Kreisbeschleuniger (Zyklotron) an Stelle eines großen Kernreaktors. Er ist so kompakt, dass er in den Keller eines typischen Krankenhauses passt, und soll ^{99m}Tc direkt erzeugen, statt den Zwischenschritt über Molybdän-99 zu gehen. Dazu schießt er Protonen in ein Target aus Molybdän-100. Wegen der kurzen Halbwertszeit der entstehenden ^{99m}Tc -Isotope kann ein solches Zyklotron zwar nur in Kliniken in begrenztem Umkreis damit versorgen. Allerdings gibt es schon heute in vielen großen Städten Beschleunigeranlagen, die sich auf das Verfahren umrüsten lassen. Zumindest gelte das für Kanada, meint Paul Schaffer, stellvertretender Laborleiter und früherer

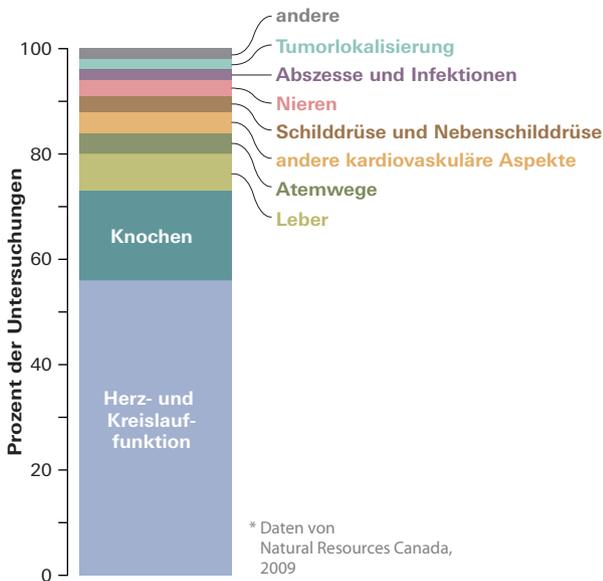


SCIENCE SOURCE / GUP

Für den möglichst zuverlässigen und sicheren Nachweis etwa von Knochentumoren, wie hier abgebildet, sind Nuklearmediziner auf das seltene Isotop Technetium-99m angewiesen.

Lebensrettendes Isotop

Mediziner setzen Technetium-99m jährlich für etwa 30 Millionen nuklearmedizinische Untersuchungen ein. Mehr als die Hälfte davon tragen dazu bei, potenziell tödliche Herzkreislaufprobleme abzuklären. Auch Krebserkrankungen und Knochenkomplikationen helfen die Tests zu erkennen.*



AMANDA MONTANEZ, NACH: NATURAL RESOURCES CANADA, DOCUMENT PRESENTED TO THE HOUSE OF COMMONS STANDING COMMITTEE ON NATURAL RESOURCES, MEETING 22, 2. JUNE 2009 / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2017

Chef der nuklearmedizinischen Abteilung am nationalen Forschungszentrum für Teilchenphysik TRIUMF in Vancouver, wo die Technik entwickelt wurde. Tests haben gezeigt, dass TRIUMF in sechs Stunden Beschleunigerbetrieb genügend ^{99m}Tc herstellt, um den täglichen Bedarf einer Population von fast fünf Millionen Menschen zu decken. Schaffer zufolge wäre mit 12 bis 24 Zyklotronen ganz Kanada versorgt.

Das Vancouver General Hospital beteiligt sich an einer klinischen Studie, in der Mediziner das mit dem Ringbeschleuniger hergestellte ^{99m}Tc für Patientendiagnosen einsetzen. Die bisherigen Ergebnisse belegen, dass die Isotope genauso anwendungssicher und wirksam sind wie jene, die aus Molybdän-99 gewonnen werden.

TRIUMF und andere Partner im ITAP-Programm haben ein Unternehmen gegründet, um die Technik auf weitere Kreisbeschleuniger zu übertragen. Ihren Angaben zufolge existieren weltweit mehr als 500 Zyklotrone, die medizinischen Zwecken dienen und hinreichend starke Protonenstrahlen erzeugen, um Molybdän-100 in ^{99m}Tc umzuwandeln – zusätzlich zu ihren bereits bestehenden Aufgaben, etwa Isotope für die Positronen-Emissionstomografie zu produzieren. Das ist von großem Vorteil, denn ein neues medizinisches Zyklotron anzuschaffen, kostet mehrere Millionen Dollar, während ein bereits vorhandenes umzurüsten nur ein Zehntel der Kosten verursacht.

In den USA bringt man dem Zyklotronverfahren wenig Enthusiasmus entgegen. US-Kliniken gehörten zwar zu den Ersten, die Kreisbeschleuniger zu medizinischen Zwecken bauen ließen, doch diese älteren Modelle erreichen nicht die Strahlenergien, die zur Herstellung von ^{99m}Tc nötig sind. Deshalb fördert das US-Energieministerium Unternehmen, die ganz andere Wege der Technetiumproduktion ausloten. Eines davon namens NorthStar Medical Radioisotopes in Madison (Wisconsin) setzt auf die Erzeugung harter Röntgenstrahlung mit Hilfe eines Linearbeschleunigers (LINAC) für Elektronen. Die Röntgenphotonen sollen Neutronen aus Molybdän-100-Atomen herausschlagen, um sie in Molybdän-99 umzuwandeln, das seinerseits zu ^{99m}Tc zerfällt. Für LINACs ist die Genehmigung leichter zu bekommen als für Kernreaktoren; zudem kosten sie weniger als diese.

Schwierige Isotopentrennung

Allerdings produziert ein typischer Linearbeschleuniger das Molybdän-99 in geringeren Konzentrationen als ein Zyklotron. NorthStar hat deshalb eine völlig neue Methode entwickelt, um ^{99m}Tc aus dem Gemisch der Molybdänisotope abzuspalten. Das als RadioGenix bezeichnete Verfahren pumpt den Isotopenmix durch eine Kunstharzsäule, die nur Technetium absorbiert. Dieses lässt sich anschließend mit Salzlösung herauswaschen, während die Molybdänatome für den nächsten Produktionszyklus aufbereitet werden. Das Unternehmen hofft auf eine Zulassung der Methode für klinische Anwendungen noch in diesem Jahr.

Ein anderer Lösungsansatz stammt von SHINE Medical Technologies in Janesville, Wisconsin. Das Unternehmen beabsichtigt, Molybdän-99 zu produzieren, indem es eine Lösung schwach angereicherten Urans mit Neutronen bombardiert. Diese soll ein LINAC bereitstellen, der Deuterium in Tritium schießt. Beides sind schwere Isotope des Wasserstoffs, und wenn sie mit hinreichender Energie aufeinanderprallen, fusionieren sie zu Helium. Die Reaktion setzt ein Neutron frei, welches seinerseits Kernspaltungen im schwach angereicherten Uran auslöst, bei denen Molybdän-99 anfällt. Laut dem Unternehmen entstehen dabei Isotopenkonzentrationen, die vergleichbar mit jenen der etablierten Herstellungsverfahren sind. Im Februar 2016 erteilte die US-Atomaufsichtsbehörde der Firma die Genehmigung, eine Produktionsanlage zu bauen. SHINE Medical Technologies hofft, 2020 mit dem Vertrieb der Isotope beginnen zu können.

Hoch entwickelte Technologie garantiert allerdings keinen Erfolg. Ausschlaggebend wird auch sein, wer ^{99m}Tc zu den günstigsten Preisen anbieten kann. Derzeit kostet eine Dosis zwischen 20 und 25 Dollar. Das liegt weit unter den tatsächlichen Produktionskosten – unter anderem, weil die Staaten den Bau, Unterhalt und das Abfallmanagement von Kernreaktoren finanziell unterstützen. Mit den neuen Technologien und mehr privater Beteiligung an der Vertriebskette wird es erforderlich sein, die Preise für ^{99m}Tc anzupassen. Einige Kliniken bereiten sich bereits auf einen 40-prozentigen Anstieg in den kommenden Jahren vor.

Allerdings gibt es widersprüchliche Prognosen dazu, wie sich der Markt entwickeln wird. Der demografische Trend sollte den ^{99m}Tc -Bedarf steigen lassen, weil die Zahl der kardiovaskulären Untersuchungen zunimmt; auch wächst die Nachfrage in China rasch. Andererseits hat die Verknappung 2009 und 2010 viele Kliniken dazu veranlasst, die ^{99m}Tc -Menge pro Dosis zu reduzieren und somit den Bedarf zu senken; die Bildqualität blieb dank immer ausgefeilterer Software trotzdem hoch. Dennoch gibt es bei Experten wenig Zweifel daran, dass die neuen Technologien rasch vorangetrieben werden müssen. ◀

Mark Peplow arbeitet als Wissenschaftsautor bei Cambridge (Vereinigtes Königreich).

QUELLEN

Murthy, V. L., Lehrich, J., Nallamothu, B. K.: Cardiac Stress Testing and the Radiotracer Supply Chain: Nuclear Freeze. In: JAMA Cardiology 1, S. 616–617, 2016

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine: Molybdenum-99 for Medical Imaging. Washington, DC: The National Academies Press. 10.17226/23563, 2016

Small, G. R. et al.: Lessons from the Tc-99m Shortage: Implications of Substituting Tl-201 for Tc-99m Single-Photon Emission Computed Tomography. In: Circulation Cardiovascular Imaging 6, S. 683–691, 2013

SOCIAL BOTS EINE ARMEE VIRTUELLER SCHLÄFERAGENTEN

Londoner Forscher haben per Zufall ein riesiges Netzwerk automatisierter Twitterprofile entdeckt. Von wem sie erstellt wurden und was ihr Zweck ist, stellt Experten jedoch vor ein Rätsel.

Wissenschaftler des Londoner University College haben auf dem Kurznachrichtendienst Twitter mehr als 350 000 gefälschte Nutzerprofile entdeckt, die vermutlich ein einzelner Betreiber kontrolliert. Es ist eines der größten, wenn nicht sogar das größte bisher enttarnete Netzwerk so genannter Social Bots, das dazu genutzt werden könnte, Meinungen in dem sozialen Netzwerk zu manipulieren. Das Botnetz ruht zwar zurzeit – die automatisierten Profile versenden keine Nachrichten. Aber es könnte jederzeit reaktiviert werden, vermuten die Forscher.

Auf Twitter können Nutzer bis zu 140 Zeichen lange Kurztexte veröffentlichen. Diese Tweets werden an andere Nutzer geschickt, die dem Absender »folgen«, also sein Profil abonniert haben. Tweets sind oft aber auch für Außenstehende sichtbar, die etwa über eine Suchmaschine auf

Spektrum
der Wissenschaft

SCHREIB- WERKSTATT

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

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

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

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

einem Nutzerprofil landen: Twitterprofile sind in der Regel öffentlich. Dem US-Unternehmen zufolge gibt es weltweit mehr als 310 Millionen aktive Twitterkonten, die pro Tag insgesamt etwa 500 Millionen Tweets absetzen.

Juan Echeverria und Shi Zhou entdeckten das Botnetz eher zufällig. Die Londoner Informatiker wollten eigentlich den systematischen Messfehler erforschen, den viele auf Twitterdaten basierende Studien aufweisen. Die meisten dieser Studien arbeiten mit einer Stichprobe, die Forscher über eine Schnittstelle von der Twittersoftware erhalten – eine zufällige Auswahl beispielsweise eines Prozents aller Tweets, die gerade abgesetzt wurden. Oder Studienautoren definieren eine Nutzergruppe, beispielsweise Studenten einer bestimmten Universität, und werten deren Tweets aus.

»All diese Ansätze haben das Problem, dass die Stichprobe nicht repräsentativ ist«, meint Shi Zou. So bevorzuge die Twittersoftware Tweets aktiver Nutzer vor denen weniger eifriger. Das könnte die Forschungsergebnisse verfälschen. Diese sagen dann beispielsweise die öffentliche Stimmung angesichts großer Ereignisse voraus oder warnen sehr früh vor Naturkatastrophen wie Erdbeben: »Solche Themen erzeugen Aufsehen und sind beliebt, aber es ist Besorgnis erregend, dass sich Forscher kaum darum kümmern, ob ihre Daten gut und repräsentativ sind.«

Zusammen mit seinem Kollegen wandte Shi Zou deshalb die »random uniform sampling method« an – der einzige bekannte Weg, aus allen Tweets tatsächlich rein zufällige auszuwählen. In diesem Fall waren es Tweets von einem Prozent aller englischsprachigen Nutzer. Aber wie sich zeigte, hatte diese Methode ein anderes Problem: Die Stichprobe umfasste sehr viele automatisierte Accounts. Das sind Profile, die zwar von einem Menschen erstellt worden sind, aber eigenständig Tweets absetzen können, nach klar definierten Vorgaben ihres Erschaffers. Sie verzerren potenzielle Forschungsergebnisse. Schließlich sollen die Resultate das abbilden, was Nutzer denken, und nicht das, was sie den Bot-Erschaffern zufolge denken sollen.

Natürliche menschliche Sprache aus Büchern, um der Entdeckung zu entgehen

Allein in dem Datensatz von Echeverria und Zhou befanden sich 3000 Bots eines einzigen Botnetzes, wie die Forscher herausfanden. Die automatisierten Profile veröffentlichten jeweils einige Kurznachrichten im Juni und Juli 2013, »nicht zu viele und nicht zu wenige, um nicht aufzufallen«, wie Echeverria und Zhou schreiben. Die Tweets der Bots bestanden aus Zitaten aus »Star Wars«-Büchern, die ein Computeralgorithmus offenbar zufällig ausgewählt hatte. Dadurch enthielten die Tweets natürliche menschliche Sprache, was bei der Tarnung half. Das erschwert die automatische Erkennung durch Algorithmen, die Twitter für die Suche nach Botprofilen nutzt.

Allerdings begannen oder endeten viele der Tweets mit einem unvollständigen Wort, zudem waren so genannte Hashtags – #-Zeichen, mit denen Twitternutzer Schlagworte in ihren Nachrichten markieren – offenbar beliebig



Die oft verwendeten Begriffe realer Nutzer (Wortwolke links; die Größe entspricht der Häufigkeit, einige absolute Werte grau)

vor einige Begriffe gesetzt worden. Einer der Tweets lautete beispielsweise: »Luke's answer was to put on an extra burst of speed. There were only ten meters #separating them now. If he could cover t.« Weiter reichte das Zitat nicht, da an diesem Punkt die Zeichenbegrenzung von Twitter erreicht war.

Den Forschern fielen die betreffenden Accounts zunächst deshalb auf, weil sie Nachrichten mit seltsamen Ortsangaben verschickten. Die Tweets schienen beispielsweise mitten auf dem Ozean gesendet worden zu sein oder in einer Wüste. Die Informatiker erkannten darin eine schon länger bekannte Verschleierungstechnik: Botnetze verwenden häufig zufällige Ortsdaten, um die Profile echter wirken zu lassen. Die Nachrichten scheinen schließlich von einem realen Ort zu kommen. Ein Tweet aus der Mitte des Ozeans ist allerdings eher unwahrscheinlich, was die Grenzen der Methode aufzeigt. Als sich die Londoner Forscher die Accounts genauer anschauten, fiel ihnen zudem auf, dass alle Nachrichten von einem Windows-Telefon verschickt worden waren. Die Information ist genauso wie die Ortsangabe für viele Tweets einsehbar.

Die Forscher suchten daraufhin anhand dieser Merkmale nach weiteren Bots des Netzwerks, das sie Star Wars Botnet taufte, indem sie Twitter nach Begriffen aus »Star Wars« durchsuchten und sich auf Profile konzentrierten, die weniger als 10 Follower hatten und weniger als 31 anderen Nutzern folgten. Das ist für Bots typisch. 3000 auf diesem Weg gefundene Profile nutzen die Informatiker schließlich als Trainingsdaten für einen Künstliche-Intelligenz-Algorithmus, der Gemeinsamkeiten in der Wortwahl finden sollte. Als Vergleichsgruppe dienten 9000 Profile realer Nutzer.

Der so genannte Klassifikator – ein Algorithmus, der besonders gut Muster in Daten erkennt und diese in Gruppen sortiert – hatte zuvor erfolgreich Spam-Mails detektiert. Auch sie fallen häufig durch sprachliche Gemeinsamkeiten auf. Nach einigen computerlinguistischen Anpassungen konnte der Algorithmus die Bots des Star-Wars-Netzwerks mit einer Genauigkeit von 99 Prozent von echten Nutzern unterscheiden. Als Echeverria und Zhou mit diesem Algorithmus alle Twitternutzer durchleuchteten, enttarnte er insgesamt 350 000 Bots, die alle zum erwähnten Botnetz gehören sollen.

TEILCHENPHYSIK LASERSPEKTROSKOPIE MIT ANTIMATERIE

Erstmals haben Physiker ultraviolette Strahlungsübergänge bei einem Antimaterie-Atom beobachtet und höchst präzise gemessen. Wie die Ergebnisse zeigen, ist die fundamentale Symmetrie im Standardmodell der Teilchenphysik offenbar nicht verletzt. Damit bleibt weiterhin ungeklärt, warum das Universum praktisch keine Antimaterie enthält.

Als es Paul Dirac 1928 gelang, eine Theorie der Quantenmechanik zu formulieren, die mit der speziellen Relativitätstheorie vereinbar ist, war der Preis dafür das Postulat von Antimaterie. Diese Antiteilchen sollten ihren gewöhnlichen Partnern in allen Quanteneigenschaften gleichen, ihre Ladung würde jedoch das jeweils entgegengesetzte Vorzeichen aufweisen. Die bekanntesten Kandidaten unter ihnen sind die positiv geladenen Positronen als Antiteilchen der Elektronen und die negativ geladenen Antiprotonen als Pendant zu den Protonen.

Seit Carl Anderson die Positronen 1932 in Sekundärereignissen der kosmischen Höhenstrahlung nachwies, gibt es keinen Zweifel mehr an der Existenz von Antimaterie, wenngleich das Universum nahezu ausschließlich aus Materie besteht. Diese Materie-Antimaterie-Asymmetrie ist noch immer eines der großen Rätsel der Physik.

Eng damit verknüpft ist die Frage nach grundlegenden Symmetrien in der Teilchenphysik. Das Standardmodell der Teilchenphysik geht von der so genannten CPT-Invarianz aus. Ihr zufolge bleibt bei jeglichen Prozessen von Teilchen- oder Kernzerfällen die fundamentale Symmetrie der simultanen Raumspiegelung (Paritätstransformation, P), sowie der Zeit- und Ladungsumkehr (T und C) erhalten. Diese Eigenschaft schränkt aber auch die Möglichkeiten zu einer sinnvollen Erweiterung des Standardmodells entsprechend ein.

Wäre die CPT-Invarianz unter gewissen Umständen verletzt, ließe sich damit der Überschuss an gewöhnlicher Materie erklären. Ob diese Symmetrie jedoch tatsächlich in der Natur exakt erhalten ist oder nicht, ist nach wie vor eine offene Frage.

Vom Zerfall bestimmter Mesonen (jeweils bestehend aus einem Quark-Antiquark-Paar) weiß man hingegen, dass eine weniger starke Symmetrie, die so genannte CP-Invarianz, bereits im Rahmen des Standardmodells verletzt ist. In Systemen neutraler K- und B-Mesonen haben Physiker die Verletzung dieser Symmetrie experimentell sehr genau untersucht. Sie reicht jedoch nicht aus, um die beobachtete Materie-Antimaterie-Asymmetrie zu erklären. Dazu benötigt man neue Mechanismen wie die so genannte Leptogenese oder eben eine Verletzung der CPT-Invarianz, die jenseits des Standardmodells liegt.

Deshalb suchen die Forscher intensiv nach einer Verletzung der CPT-Symmetrie. Bei Teilchenzerfällen ließ sie sich bisher nicht nachweisen. Mit einem anderen Ansatz fahnden die Wissenschaftler nach Unterschieden bei Energieübergängen in Atomen beziehungsweise Antiatomen. Einen ersten solchen Test legten Mitarbeiter der ALPHA-Kollaboration am CERN in Genf vor. Sie haben den Übergang vom Grundzustand in den ersten angeregten Zustand (1S nach 2S) bei Antiwasserstoff-Atomen mittels Laserspektroskopie auf etwa zwei Zehnmilliardstel (10^{-10}) genau gemessen.

Mit dieser Methode lassen sich die atomaren Energieniveaus hochpräzise bestimmen, da das Laserlicht auf einen schmalen Wellenlängenbereich beschränkt ist. Von besonderer Bedeutung ist der Übergang vom Grundzustand des Wasserstoffatoms – dem so genannten $1S_{1/2}$ -Zustand – in den mit einer Achtelsekunde vergleichsweise langlebigen ersten angeregten $2S_{1/2}$ -Zustand. Die Anregungsfrequenz dazu fällt jedoch in den ultravioletten Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Das erschwert die Spektroskopie enorm, da sich die nötigen, extrem kurzen Wellenlängen nicht mit gewöhnlichen Farbstofflasern erzeugen lassen.

Um das Problem zu lösen, greifen die Physiker zu einem Trick. Sie regen die Atome gleichzeitig mit zwei Lichtquanten der doppelten Wellenlänge an. Damit erfüllen sie nicht nur die Energie-, sondern zugleich die Drehimpulserhaltung. Mit dieser Zweiphotonenspektroskopie mit gegenläufigen Laserstrahlen lässt sich außerdem die Dopplerverbreiterung der Spektrallinien umgehen, die durch die Restbewegung der Atome in einer Falle bezüglich der absorbierten Laserstrahlung zu Stande kommt. Die Messgenauigkeit des 1S-2S-Übergangs in atomarem Wasserstoff liegt mit dieser von Theodor Hänsch und seinen Kollegen entwickelten Methode inzwischen bei wenigen Billionstel (10^{-15}). Damit ist die optische Spektroskopie heutzutage eine der präzisesten Messmethoden der Physik.

Antiprotonen und Positronen lassen sich leicht fangen, neutraler Antiwasserstoff jedoch nicht

Die Idee, auf diese Weise auch den 1S-2S-Übergang von Antiwasserstoff zu messen und damit die CPT-Invarianz zu untersuchen, ist bereits 30 Jahre alt. Sie experimentell umzusetzen, war jedoch alles andere als einfach.

Während sich Antiprotonen und Positronen dank ihrer Ladung recht einfach bewegen und in elektrischen beziehungsweise magnetischen Teilchenfallen einfangen lassen, ist das bei neutralem Antiwasserstoff sehr viel schwieriger. Mit speziellen magnetischen Fallen lässt sich aber das kleine magnetische Moment des Antiatoms ausnutzen. Da Antimaterie beim Kontakt mit normaler Materie zudem sofort zerstört wird, müssen die Parameter von elektrischem und magnetischem Feld in der Falle sehr präzise eingerichtet sein, um genügend Antiatome isolieren und dann per Laser anregen zu können.

Erstmals gelang es Forschern der ALPHA-Arbeitsgruppe unter der Ägide von Jeffrey Hangst im Jahr 2010, Antiwasserstoff in einer magnetischen Falle bei Tempera-

Das Kombipaket im Abo: App und PDF

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. (Angebotspreise nur für Privatkunden)



www.spektrum.de/abonnieren



ALPHA ist eines von sechs Experimenten mit Antiprotonen am Europäischen Forschungszentrum CERN in Genf. Mit ihm haben Wissenschaftler erstmals einen ultravioletten Strahlungsübergang in Antiwasserstoff-Atomen gemessen.

turen von wenigen Grad über dem absoluten Nullpunkt zu speichern. Doch erst kürzlich konnten die Wissenschaftler die geeigneten Bedingungen für die Laserspektroskopie an Antiwasserstoff herstellen. Die Antiatome erzeugten sie, indem sie ein Plasma aus Antiprotonen vom Antiproton Decelerator (AD) mit Positronen aus einer radioaktiven Quelle mischten. Dabei war die Ausbeute relativ gering. Pro 15-minütigem Zyklus ließen sich etwa 25 000 Antiwasserstoff-Atome erzeugen. Zwei solcher Mischzyklen waren jedoch notwendig, um im Mittel 14 solcher Partikel für das Experiment in einer Falle für zehn Minuten zu speichern.

Die eingefangenen Atome bestrahlten die Physiker mit ultraviolettem Laserlicht einer Wellenlänge von 243 Nanometern, dessen Frequenz der Hälfte der 1S-2S-Übergangsenergie entsprach. Dabei berücksichtigten sie – analog zu Experimenten mit normaler Materie – die Verschiebung der Energieniveaus im Magnetfeld sowie die Hyperfeinaufspaltung, die durch die Wechselwirkung der Spins von Positron und Antiproton zu Stande kommt.

Danach waren 58 Prozent der Atome in den ersten angeregten Zustand gehoben und aus der Falle entwichen. Dieses Ergebnis lässt sich in eine Grenze für die mögliche Verletzung der CPT-Symmetrie bei Antiwasserstoff umrechnen.

Zur Kontrolle bestrahlten die Forscher den Antiwasserstoff mit Laserlicht etwas unterhalb der Resonanzfrequenz oder schalteten die Lichtquelle ganz ab. In beiden Fällen blieb die Anzahl der Atome in der Falle unverändert.

Diese Messungen zeigen, dass die CPT-Symmetrie bei Antiwasserstoff innerhalb einer Genauigkeit von etwa zwei Zehnmilliardstel erhalten bleibt. Für noch präzisere Aussagen über eine mögliche CPT-Verletzung planen die Forscher detaillierte Messungen der Linienform des 1S-2S-Übergangs. Da die Linienbreite unter anderem durch die Restbewegung der Antiatome in der Falle beeinflusst wird, soll diese ferner in einem künftigen Experiment durch Laserkühlung noch besser unterdrückt werden.

Mit Antiwasserstoff wollen die Physiker außerdem die Gültigkeit von Gravitationstheorien überprüfen. Da die Antiatome elektrisch neutral sind, lässt sich mit ihnen sehr viel präziser als mit geladenen Teilchen wie Positronen oder Antiprotonen testen, ob sich Materie und Antimaterie im Gravitationsfeld gleich verhalten, insbesondere ob Antimaterie wie erwartet nach unten und nicht etwa nach oben fällt. Auch die Basis der allgemeinen Relativitätstheorie, die Gleichheit von träger und schwerer Masse – das so genannte Äquivalenzprinzip – soll bei Antimaterie getestet werden; bei normaler Materie ist es mit hoher Genauigkeit erfüllt.

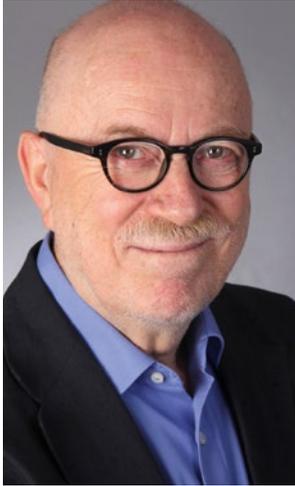
So sollen zwei Experimente zunächst die Beschleunigung von Antiwasserstoff im Gravitationsfeld der Erde mit einer Genauigkeit im Prozentbereich messen. Vor allem mit dem neuen, noch 2017 in Betrieb gehenden Antiprotonen-Ring ELENA (Extra Low Energy Antiproton ring) am CERN sollte es dann den Antiprotonen-Arbeitsgruppen in ein paar Jahren möglich sein, sowohl hochgenaue Ergebnisse zu diesem Thema zu liefern, als auch die spektroskopischen Messungen deutlich zu verbessern und auf Übergänge zwischen anderen Energieniveaus zu erweitern.

Für die Vereinigung des Standardmodells der Teilchenphysik mit der Gravitation wird das sicherlich wichtige Randbedingungen und neue Anregungen liefern. Viele Theorien wie etwa manche Stringtheorien, die auf eine solche Vereinigung hinarbeiten, setzen eine Verletzung der CPT-Symmetrie voraus – umso wichtiger ist es zu klären, ob sie in der Natur tatsächlich vorkommt. ◀

Georg Wolschin ist Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg.

QUELLE

Ahmdi, M. et al.: Observation of the 1S–2S Transition in Trapped Antihydrogen. In: Nature 541, S. 506–510, 2016



SPRINGER'S EINWÜRFE AUTOMATISCHE VORURTEILE

Seit künstliche Intelligenz lernt, besser mit menschlicher Sprache umzugehen, kann sie darin enthaltene Stereotype aufspüren und reproduzieren. Das ist aber nicht immer wünschenswert!

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

» spektrum.de/artikel/1461021

Apple hat Siri, Microsoft kommt mit Cortana, und bei Amazon versteht Alexa fast jeden Wunsch, den ein sprechender Plastikzylinder zu erfüllen vermag: Die Auffassungsgabe dieser »intelligenten persönlichen Assistenten« ist wirklich verblüffend. Hinter der Suggestion, dass ich mich mit einem Ding unterhalte wie mit einem grenzenlos diensteifrigen Menschen, stecken Jahrzehnte millienschwerer Entwicklungsarbeit für künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen.

Die automatisierte Sprachkompetenz der fortschrittlichsten KI-Programme lässt sich aber nicht bloß nutzen, um Kunden zu befriedigen, sondern auch, um Forschern sozialpsychologische Erkenntnisse über Mensch und Maschine zu verschaffen. Die Computerwissenschaftlerinnen Aylin Caliskan von der Princeton University in New Jersey (USA) und Joanna J. Bryson von der University of Bath in England sind der Frage nachgegangen, inwieweit eine lernfähige Sprachsoftware automatisch die unter Menschen verbreiteten

Künstliche Kommunikation läuft nicht »politisch korrekter« ab als sonstiger Sprachverkehr

vorgefassten Meinungen reproduziert (*Science* 356, S. 183–186, 2017).

Die Forscherinnen nahmen sich den Impliziten Assoziationstest (IAT) des US-Psychologen Anthony G. Greenwald zum Vorbild, ein klassisches Werkzeug zum Messen menschlicher Vorurteile: Testpersonen sollen auf einem Computerschirm erscheinende Namen und Begriffe per Tastenklick bestimmten Kategorien zuordnen, wobei die Reaktionszeit gemessen wird. Dabei zeigt sich – und zwar viel deutlicher als bei persönlichen Befragungen – die Macht sozialer Stereotype. »Weiblich«

wird besonders bereitwillig dem Begriffsfeld »Helfer«, »Pfleger«, »Assistent« zugewiesen, während »männlich« schnell mit »Leiter«, »Chef«, »Anführer« assoziiert wird. Hingegen zögern die meisten Probanden auffällig, bei ausländisch klingenden Eigennamen oder exotischen Ethnien an »angenehm« und »freundlich« zu denken.

Caliskan und Bryson entwickelten nun einen Algorithmus namens WEAT (Word-Embedding Association Test). Er spürt in einem aus dem Internet entnommenen Fundus von 2,2 Millionen englischen Worten mit KI-Methoden statistische Begriffszusammenhänge auf. Dabei treten dieselben Stereotype zu Tage wie im IAT; beispielsweise korreliert der rassistisch gemeinte Begriff »weiß« deutlich stärker mit »angenehm« als der Begriff »schwarz«.

Der IAT-Schöpfer Greenwald begrüßt den WEAT als willkommene Erweiterung seines Assoziationstests. Man könnte damit ohne große Personentests historische Veränderungen verfolgen und etwa den mutmaßlichen Trend belegen, dass die Vorurteile gegen Schwule und Lesben vielerorts mit der Zeit abnehmen (*Science* 356, S. 133–134, 2017).

Aus alledem folgt aber auch: Die künstliche Kommunikation – ob mit dem Internet oder zwischen Mensch und Maschine – läuft nicht »politisch korrekter« ab als der sonstige Sprachverkehr. Die Unterhaltung mit einem intelligenten persönlichen Assistenten wird von den üblichen Vorurteilen geprägt. Nicht ohne Rücksicht darauf spricht zum Beispiel ein dienstfertiger Automat, sei es Navi oder Siri, in der Regel mit weiblicher Stimme.

Also werden die Debatten über Political Correctness demnächst auch die Mensch-Maschine-Kommunikation erfassen: Dürfen Automaten gängige Vorurteile bestärken? Sollen Zensurprogramme die einschlägigen Algorithmen von allen Stereotypen reinigen? Aber wie aussagekräftig sind ihre Antworten dann? Taugt eine derart geübte Kunstsprache noch zur Wiedergabe der sozialen Wirklichkeit?



TIERHALTUNG TICKENDE ZEITBOMBE



Die Belege mehren sich: Massentierhaltung bringt superresistente Keime hervor – die auf den Menschen überspringen können.

» spektrum.de/artikel/1461023



Melinda Wenner Moyer ist Wissenschaftsautorin im US-Bundesstaat New York. Diesen Beitrag von ihr zeichnete die Association of Health Care Journalists (Vereinigung der Medizinjournalisten) mit einem ersten Platz aus.

Erst als mich ein Schwein vorsichtig anstupst und an mir schnüffelt, bringe ich den Mut auf, es zu streicheln. Schon tags zuvor habe ich tausende andere gesehen, doch jegliche Berührung ängstlich vermieden. Dieses eine Tier schafft es, meine Reserviertheit aufzubrechen. Als ich über die Borsten seines rosa Köpfchens streiche, grunzt es laut.

Die Atmosphäre in dem überfüllten Viehstall, inmitten beißenden Gestanks, ist allerdings alles andere als kuschelig. Der Stall ist Teil einer Farm in Frankfort (Indiana), 45 Meilen nordwestlich von Indianapolis, in der jährlich 30000 Schweine aufgezogen werden. Die Tiere gehören dem Agrarunternehmen TDM Farms. Mit dieser Firma hat der Farmbesitzer Mike Beard vertraglich vereinbart, dass er die Schweine ab einem Alter von 14 Tagen, wenn sie gerade entwöhnt sind, für ein halbes Jahr zwecks Aufzucht bei sich unterbringt. Im Alter von sechs Monaten werden die Tiere wieder abtransportiert und zu Koteletts, Wurstwaren und Filets verarbeitet.

In dem ungefähr 12 mal 60 Meter großen Stall drängen sich 1100 Schweine, jedes Tier hat also rechnerisch 0,65 Quadratmeter zur Verfügung. Da TDM Farms nicht für die Anzahl der Tiere bezahlt, sondern für den Platz, den Beard zur Verfügung stellt, »ist es für das Unternehmen von Vorteil, die Ställe so voll zu stopfen wie nur möglich«, erläutert der Farmbesitzer. Abends um halb acht, erwähnt er im Gespräch, solle ein Sattelschlepper weitere 400 Ferkel liefern. Sobald sie angekommen seien, wolle er ihnen das von TDM genehmigte Futtermittel verabreichen.

AUF EINEN BLICK BRUTFABRIKEN FÜR SUPERKEIME

- 1 Nutztiere bekommen deutlich öfter Antibiotika verabreicht als Menschen. Die Gefahr, dass hierdurch resistente Bakterien entstehen, ist bei ihnen deshalb wesentlich höher.
- 2 Studien belegen immer deutlicher, dass sich Arzneimittelresistenzen in landwirtschaftlichen Betrieben viel schneller und weiter verbreiten, als man das früher für möglich hielt.
- 3 Die resistenten Keime aus der Tierzucht drohen auf Menschen überzuspringen – auch wenn Vertreter der Agrarindustrie diese Sorge vielfach als übertrieben bezeichnen.



PATRICK CAVANAH/BRUNN

Ungesunde Enge: In einem Schweinezuchtbetrieb in Indiana, USA, treibt eine Angestellte frisch entwöhnte Ferkel einen Korridor entlang. In dem Stall, den die Tiere beziehen, werden sie kaum mehr Platz haben als in diesem Flur.

Dieses enthält Antibiotika – ein Muss, wenn die Tiere in ihrer überfüllten, mit Gülle durchtränkten Umgebung einigermaßen gesund bleiben sollen. Die Antibiotika sorgen zudem dafür, dass die Borstentiere schneller wachsen, und das sogar bei reduzierter Futtergabe. Lange Zeit war es daher gang und gäbe, solche Mittel in der industriellen Tierzucht einzusetzen.

Diese Praxis hat jedoch eine erschreckende Kehrseite, und hier liegt einer der Gründe, warum ich so zögerlich gewesen bin, die Schweine anzufassen. Der überbordende Gebrauch von Antibiotika verwandelt harmlose Nutztiere in Keimfabriken. Die Tiere werden zu Brutstätten tödlicher Mikroorganismen, etwa des methicillinresistenten Bakteriums *Staphylococcus aureus* (MRSA), das gegenüber mehreren Antibiotikaklassen unempfindlich ist und als Krankenhauskeim massive Probleme bereitet. Antimikrobielle Substanzen steigern zunächst den Erfolg der industriellen Viehzucht, aber es gibt immer einige Bakterien mit besonderer genetischer Ausstattung, die den Wirkstoffen widerstehen und diese Fähigkeit an andere Mikroben weitergeben, so dass sich die Resistenz immer weiter verbreitet. Neuere Forschungsergebnisse zeigen, dass diejenigen Abschnitte der DNA, welche für die Antibiotikaresistenz verantwortlich sind, sogar zwischen verschiedenen Bakterienstämmen hin und her springen – und das erschreckend häufig (siehe auch **Spektrum** März 2015, S. 36). Und Anfang 2016 stellten Forscher fest, dass ein

Gen, welches die Resistenz gegen ein Reserveantibiotikum vermittelt, bereits in diversen Keimen nachweisbar ist. Unter anderem in Bakterien, die eine Frau in Pennsylvania infiziert hatten. Reserveantibiotika dürfen nur unter strengen Auflagen eingesetzt werden; sie sind jenen Infizierten vorbehalten, deren Keime bereits gegen die üblichen Wirkstoffe resistent sind, und bilden somit ein letztes Bollwerk gegen die Mikroben.

Kehren die Schrecken von Wundbrand, Kindbettfieber, Pneumonie & Co. zurück?

Immer größer wird die Sorge, der exzessive Antibiotikagebrauch in der Massentierhaltung könnte unsere Fähigkeit untergraben, bakterielle Infektionen zu bekämpfen. Laut den neuen Forschungsergebnissen verbreiten sich Resistenzgene in kurzer Zeit oft viel weiter als früher angenommen; sie können vom Mastbetrieb ausgehend die ganze Verarbeitungskette durchlaufen und schließlich auf unserem Teller landen. Auch wenn die Agrarindustrie diese Verbindung immer wieder angezweifelt hat. Im Jahr 2014 verkauften Pharmaunternehmen fast 10 000 Tonnen medizinisch bedeutsamer Antibiotika für den Einsatz in der Massentierhaltung – das ist mehr als dreimal so viel, wie Menschen verschrieben bekommen. Sollten diese Arzneistoffe eines Tages nicht mehr wirken, weil sich die Resistenzen flächendeckend verbreitet haben, würden heute eher harmlose Komplikationen wie Ohrenentzündungen, Schnittwunden oder Bronchitis zu potenziell tödlichen Leiden.

Noch behauptet die Agrarindustrie, diese Sorgen seien völlig übertrieben. Die These, dass Antibiotika in Tieren

»ein direktes Gesundheitsrisiko für den Menschen darstellen, halten wir für maßlos überzogen«, meint Richard Carnevale, Vizepräsident für regulatorische, wissenschaftliche und internationale Angelegenheiten am Animal Health Institute, das veterinärpharmazeutische Unternehmen vertritt. Er und andere Industrievertreter weisen darauf hin, Wissenschaftler hätten keinen direkten Zusammenhang belegt zwischen dem Antibiotikagebrauch bei Nutztieren und resistenten Keimen bei Menschen. Viele arzneimittelunempfindliche Krankenhauskeime hätten niemals mit landwirtschaftlichen Betrieben oder Fleisch in Verbindung gebracht werden können.

Wissenschaftler halten dagegen, die Agrarindustrie übertreibe ihrerseits das Ausmaß der wissenschaftlichen Unsicherheit – ja, sie fördere diese Unsicherheit sogar. »Ehrlich gesagt erinnert mich das Verhalten der Agrarunternehmen an jenes der Tabak-, Asbest- und Ölindustrie«, sagt James Johnson, Infektionsmediziner an der University of Minnesota, der über antibiotikaresistente Krankheitserreger forscht. Wie viele andere Forscher räumt auch er ein, es sei schwierig, die Zusammenhänge zwischen Massentierhaltung und menschlicher Gesundheit zu belegen. Doch die Agrarindustrie macht es seiner Meinung nach absichtlich noch schwerer. Einige große Fleischproduzenten weisen ihre Züchter an, Wissenschaftlern den Zutritt zu Mastbetrieben zu verwehren, mit dem Argument, die Tiere müssten vor Fremden und deren potenziellen Krankheiten geschützt werden. Das behindert wissenschaftliche Untersuchungen des Problems massiv. Tara Smith, Epidemiologin an der Kent State University, die sich mit neu



Die Arbeiter des Mastbetriebs Schoettmer Prime Pork benutzen einen vergitterten Wagen, um einen Eber durch einen Stall mit Sauen zu ziehen. Sein Anblick und Geruch erregen die weiblichen Tiere, was sie empfänglicher für die künstliche Befruchtung macht.

PATRICK CAVAN BROWN

aufkommenden Infektionen beschäftigt, spricht davon, die Firmen würden »Wissenschaftlern die Hände binden«.

Ich wollte mir selbst ein Bild von der Situation machen und besichtigte deshalb die Farm von Mike Beard, ebenso wie zwei weitere. Zunächst besuchte ich den Mastbetrieb Schoettmer Prime Pork in Tipton, Indiana. Das Erste, was mich dort begrüßte, war ein bedrohlich wirkendes gelbes Schild mit der Aufschrift: »Warnung: Krankheitspräventionsprogramm. Zutritt verboten.«

Keith Schoettmer, der Besitzer der Farm, erklärte mir, das Schild sei Teil seiner Bemühungen, Krankheitserreger von den 22000 Schweinen fernzuhalten, die er jedes Jahr aufzieht. »Das alte Sprichwort ›Vorbeugen ist besser als heilen‹ trifft nirgendwo mehr zu als in einem Schweinemastbetrieb«, sagte er. Er bat mich, auf unserem Rundgang durch die Anlage Schutzanzug und Kunststoffschuhe anzuziehen, damit ich seine Tiere nicht anstecke.

Bakterien gibt es überall, aber Viehzuchtbetriebe quellen von ihnen geradezu über, da Mensch und Tier dort buchstäblich durch Fäkalien waten. So gelangen die Krankheitserreger bis in die letzte Ritze des Stalls: Sie spritzen zusammen mit der Gülle meterhoch, werden mit Exkrementen überall hingeschwemmt, kontaminieren die Hände der Angestellten (ich sah nie jemanden Handschuhe tragen) und graben sich unter die Fingernägel von Besuchern, die den Tieren den Kopf kraulen.

Im Jahr 2005 belegten Wissenschaftler in den Niederlanden, einem Land mit großen Schweinemastbetrieben, dass dort viele Tierzüchter und ihre Familien unter MRSA-Infektionen leiden – und dies mit der Tierhaltung zusammenhängt. MRSA kann tödliche Haut-, Blut- und Lungeninfektionen verursachen; es grassiert seit Jahrzehnten in Kliniken und befällt neuerdings auch Menschen außerhalb medizinischer Einrichtungen. Im Jahr 2007 war jeder fünfte MRSA-Patient in den Niederlanden von Keimen angesteckt, die genetisch mit Bakterien aus inländischen Viehzuchtbetrieben übereinstimmten. Als Reaktion auf dieses Ergebnis verkündete die niederländische Regierung im Jahr 2008 strenge Maßnahmen, um den Antibiotikagebrauch auf Tierfarmen einzudämmen. Tatsächlich ging er in den beiden folgenden Jahren um 59 Prozent zurück. Dänemark, ein anderer großer Exporteur von Schweinefleisch, hatte bereits 1999 die Antibiotikabehandlung von gesunden Schweinen untersagt. Generell fährt Europa in dieser Frage einen härteren Kurs als die USA.

Wissenschaftler wissen inzwischen, dass MRSA-Stämme, die mit der Viehzucht zusammenhängen, sich auch in den Vereinigten Staaten stark verbreiten. Als Tara Smith, damals an der University of Iowa, von der Situation in den Niederlanden erfuhr, entschied sie sich dafür, einige Schweinemastbetriebe in Iowa zu überprüfen. Sie hatte persönliche Verbindungen dorthin und konnte deshalb etliche Tiere auf Keimbefall testen. »Im ersten Durchlauf nahmen wir Proben von 270 Schweinen«, schildert Smith, »wir machten Abstriche von den Schnauzen der Tiere und stellten fest, dass etwa 70 Prozent von ihnen MRSA-positiv waren.«

Smith und ihre Kollegen haben seither zahlreiche weitere Untersuchungsergebnisse veröffentlicht, aus denen

hervorgeht, dass MRSA in amerikanischen Viehzuchtbetrieben überall vorkommt. Das Team fand die multi-resistenten Keime bei zwei Drittel der Angestellten einer großen Tierfarm auf den Nasenschleimhäuten. In einem anderen Betrieb erwies sich das Tierfutter bereits als MRSA-belastet, noch bevor es überhaupt vom Lieferwagen abgeladen worden war. Mehr als 200 Meter in Windrichtung von einer dritten Anlage entfernt, konnte Smith MRSA in der Luft nachweisen. Weitere resistente Bakterienarten tauchten rund um Geflügelfarmen auf. Nachdem Forscher der Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health (Baltimore) mit geöffneten Fenstern hinter Lkws hergefahren waren, die Hühner durch Maryland und Virginia transportierten, entdeckten sie antibiotikaresistente Enterokokken im Innenraum ihrer Fahrzeuge, sowohl in der Luft als auch auf den Getränkebechern in den Flaschenhalterungen. Enterokokken verursachen allein in den USA jährlich 20000 Infektionen.

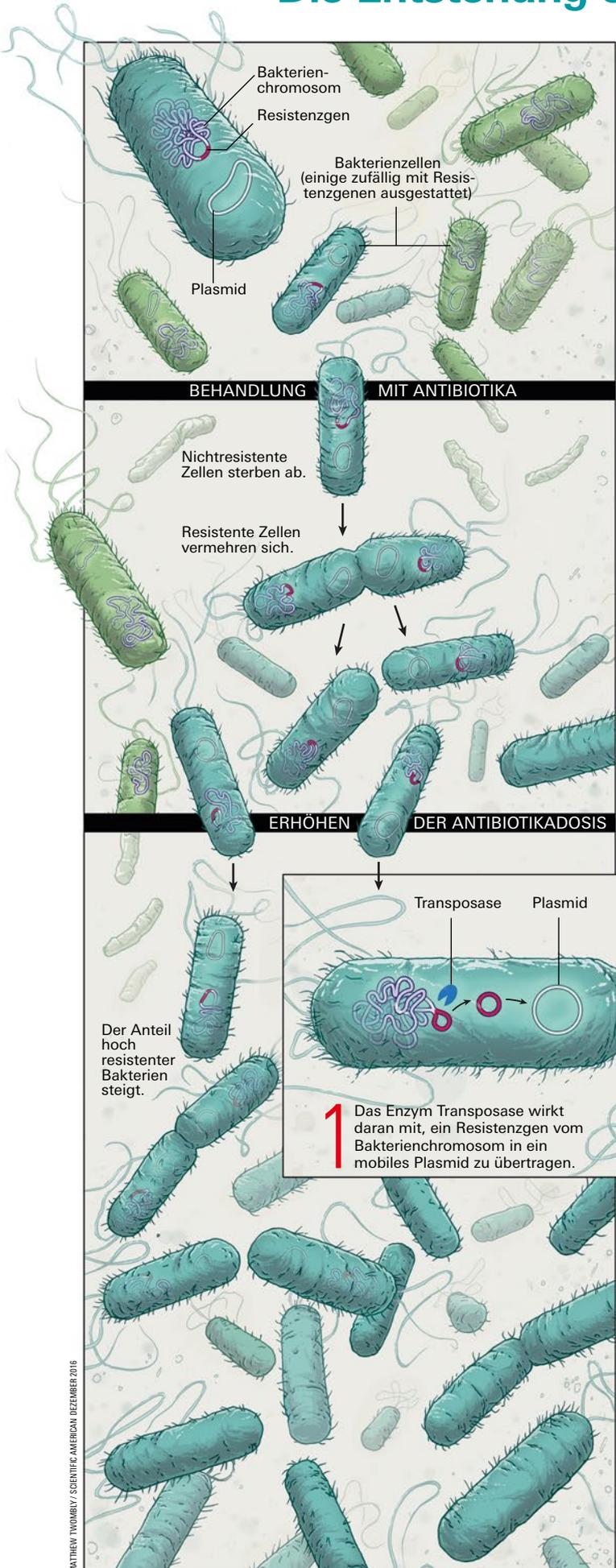
Tierische Fäkalien dienen überdies dazu, Felder zu düngen. Das heißt nichts anderes, als dass die Bakterien darin auf jenem Boden verteilt werden, auf dem unsere Nahrung wächst. Eine Studie ergab 2016: Nachdem Dung von Schweine- und Milchviehbetrieben ausgebracht worden war, vervierfachte sich die Menge der Antibiotikaresistenzgene im Boden. Eine andere Untersuchung in Pennsylvania wies in die gleiche Richtung. Hier stellte sich heraus, dass Menschen mit besonders intensivem Kontakt zu Feldern, welche mit Schweineexkrementen gedüngt werden, etwa Anwohner, ein mehr als 30 Prozent höheres Risiko tragen, sich mit MRSA zu infizieren.

Todesfälle durch *E.-coli*-verseuchten Spinat

Farmbesitzer Mike Beard betreibt ein zweites Unternehmen als Gülleausfahrer. Er belädt seinen Tankwagen mit jeweils 25000 Liter Flüssigmist vom Schwein, der auf seiner Farm anfällt, und bringt ihn auf benachbarten Äckern aus. Dieses Verfahren ist seiner Auskunft nach streng reglementiert. Er muss mit Tests sicherstellen, dass der Boden die Nährstoffe aus der Gülle aufnehmen kann, und er muss die Fäkalien so langsam ausbringen, dass sie nicht abfließen. Dennoch können Probleme auftreten. Im Jahr 2006 starben in den USA drei Menschen an *Escherichia coli*-verseuchtem Spinat. Der Ausbruch ließ sich auf verunreinigtes Wasser zurückführen, mit dem die Spinatfelder berieselt worden waren und das vermutlich mit Schweine- und Kuhexkrementen einer benachbarten Tierfarm kontaminiert war.

Es steht außer Frage, dass antibiotikaresistente Bakterien ein wachsendes Problem darstellen – für Menschen wie für Nutztiere. Aber woher kann man wissen, ob zwischen beiden eine Verbindung besteht und Resistenzen sich infolge von Massentierhaltung verbreiten? Bereits 1975 stellte sich das Animal Health Institute genau diese Frage und beauftragte den Biologen Stuart Levy, heute an der Tufts University, damit, sie zu klären. Levy und sein Team verfütterten niedrige Dosen des Breitbandantibiotikums Tetracyclin an 150 Hühner einer nahe gelegenen Farm, die noch niemals zuvor antimikrobielle Wirkstoffe erhalten hatten. Innerhalb einer Woche wurden nahezu alle *E.-coli*-

Die Entstehung eines Superkeims



Antibiotika sollen eigentlich Bakterien abtöten. Leider beeinflussen sie die Evolution von Bakterienpopulationen so, dass Mikroorganismen mit Resistenzgenen entstehen, denen die Wirkstoffe nichts mehr anhaben. Die Einzeller vererben ihre Resistenzgene an die Nachkommen, die sich weitervermehren, so dass ein wachsender Anteil der künftigen Generationen arzneistoffunempfindlich wird – Fachleute bezeichnen dies als vertikalen Transfer. Weitaus problematischer ist jedoch ein anderer Übertragungsweg, der so genannte horizontale Transfer, bei dem Gene zwischen verschiedenen Bakterienstämmen hin und her springen, was zu völlig unvorhergesehenen Resistenzbildungen führt.

VERTIKALER TRANSFER

Erstmals verabreicht, wirken Antibiotika oft überaus effektiv gegen potenziell krank machende Bakterien wie *Escherichia coli* oder *Staphylococcus aureus*. Einige Mikroben tragen aber immer zufällig Erbanlagen in sich, die ihnen die Behandlung zu überstehen helfen. Während das Gros der Bakterienpopulation abstirbt, überleben diese wenigen Einzeller, teilen sich und geben ihre Resistenzgene an die Nachkommen weiter. Da diese nun weniger Konkurrenten haben, können sie sich stark vermehren und bringen dabei massenhaft resistente Nachkommen hervor, deren Anteil an der Gesamtpopulation wächst.

1 Das Enzym Transposase wirkt daran mit, ein Resistenzgen vom Bakterienchromosom in ein mobiles Plasmid zu übertragen.

2 Bakterien können über ein Anhängsel, den Pilus, miteinander in Kontakt treten und über eine Plasmabrücke die genetische Information der Plasmid-DNA austauschen.

HORIZONTALER TRANSFER

- 1** Das Enzym Transposase schneidet die Resistenzgene aus dem Bakterienchromosom, worauf sie in ringförmige DNA-Moleküle eingefügt werden, so genannte Plasmide.
- 2** Das Bakterium kann diese DNA-Ringe über Zellfortsätze an andere Einzeller weitergeben – sogar an Vertreter komplett anderer Arten.

Bakterien im Darm der Tiere gegen Tetrazyklin resistent. Binnen drei Monaten erlangten die Mikroben zudem Resistenzen gegen vier weitere Antibiotika. Und nach vier Monaten waren selbst *E. coli* im Darm solcher Tiere, die *nicht* mit Tetrazyklin gefüttert worden waren (aber auf der gleichen Farm lebten), unempfindlich gegen den Wirkstoff geworden. Als Levy und seine Kollegen schließlich die menschlichen Besitzer des Zuchtbetriebs untersuchten, stellten sie fest, dass 36 Prozent derer Darmbakterien gegen das Mittel resistent waren – sechsmal so viele wie in der Darmflora benachbarter Farmbesitzer. Diese Befunde waren seinerzeit schockierend. Das Animal Health Institute finanzierte keine weiteren Studien, um sie zu erhärten.

Laut einer anderen Untersuchung sind mehr als 90 Prozent der *E.-coli*-Bakterien, die im Darm konventionell gezüchteter Schweine leben, resistent gegen Tetrazyklin. Erstaunlicherweise haben sogar Tiere, die ohne ständige Antibiotikagaben aufwachsen, massenhaft unempfindliche *E. coli* in ihrem Verdauungstrakt: Ganze 71 Prozent ihrer Bakterien widerstehen einer Tetrazyklinbehandlung. Schuld daran ist, dass die Mikroben ihre Resistenzgene emsig untereinander austauschen. 2012 rekonstruierte ein Team um den Mikrobiologen Lance Price, heute Direktor des Antibiotic Resistance Action Center an der George Washington University, woher jener MRSA-Stamm kam, der in Europa und den USA Schweine und ihre Züchter infizierte. Die Forscher sequenzierten die vollständigen Genome in 88 MRSA-Proben und verglichen sie miteinander. Dabei zeigte sich, dass der fragliche MRSA-Stamm zunächst als methicillinempfindliche Variante von *S. aureus* den Menschen besiedelt hatte. Erst später gingen die Bakterien auf Nutztiere über, wo sie rasch eine Resistenz gegen Methicillin und Tetrazyklin erwarben und sich weiter verbreiteten.

Unerwartet häufiger und enger Kontakt zwischen Mikroben

Anfangs nimmt die Antibiotikaresistenz einer Bakterienpopulation nur langsam und durch Zellteilung zu. Die Nachkommen resistenter Individuen sind von Beginn an unempfindlich. Doch mit der Zeit finden die dafür verantwortlichen Gene ihren Weg auf ringförmige, bewegliche DNA-Moleküle, so genannte Plasmide. In dieser Form können die Bakterien ihre Resistenzgene leicht untereinander austauschen, sogar über Artgrenzen hinweg. 2014 erschien eine Studie von Wissenschaftlern, die antibiotikaresistente *E. coli* von Menschen sowie von Hühnern gesammelt hatten. Obwohl sich die Bakterien hinsichtlich ihres Genoms deutlich unterschieden, enthielten viele von ihnen nahezu identische Plasmide mit denselben Resistenzgenen. Es war maßgeblich der Austausch solcher ringförmiger DNA-Stücke gewesen, der die Mikroben unempfindlich gemacht hatte, und nicht die Vererbung von Resistenzen im Zuge von Zellteilungen.

Die Erkenntnis, dass Arzneistoff-Unempfindlichkeiten auf diesem Weg übertragen werden können – Mikrobiologen bezeichnen ihn als horizontalen Transfer –, veränderte alles. Sie machte klar: Setzt man einen Bakterienstamm an



einem Ort einem bestimmten Antibiotikum aus, kann das die Reaktion anderer Bakterienstämme auf andere Antibiotika an anderen Orten verändern.

Resistenzen sind freilich nicht zum Nulltarif zu bekommen. Die entsprechenden Gene abzulesen, kostet Energie, die der Zelle dann nicht mehr für die Fortpflanzung zur Verfügung steht. In einer resistenten Bakterienpopulation überleben die Individuen zwar mit größerer Wahrscheinlichkeit, aber die Population wächst langsamer. Sobald also keine Antibiotika mehr einwirken, bekommen nichtresistente Individuen einen Selektionsvorteil und setzen sich gegenüber den anderen allmählich durch. Neuere Forschungsergebnisse besagen allerdings: Werden Bakterien wiederholt antimikrobiellen Substanzen ausgesetzt, erwerben sie resistenzvermittelnde Mutationen, die ihnen eine hohe Reproduktionsrate beizubehalten erlauben – und die bei Abwesenheit des Antibiotikums nicht mehr aus dem Genpool verschwinden. »Wirklich beängstigend daran ist, dass wir das bei Darmbakterien sehen, die untereinander Plasmide austauschen«, sagt der Veterinärmediziner Tim Johnson von der University of Minnesota. »Hier spielt sich vor unseren Augen eine Mikrobenevolution innerhalb des Wirtsorganismus ab.«

Es können auch mehrere Resistenzgene auf dem gleichen Plasmid landen, wenn nämlich eines davon einen Überlebensvorteil verschafft und die anderen quasi im Schlepptau der Selektion mit sich zieht. Das Ausmaß dieser so genannten Koselektion sei uns »noch längst nicht bewusst«, wie Johnson meint. Mehr darüber herauszufinden, sei unerlässlich, wenn wir die damit einhergehenden Gefahren abschätzen wollten. Einige Antibiotika, die in Tierhaltungsbetrieben eingesetzt werden, dienen selten oder nie zur Anwendung beim Menschen. Vor allem die Agrarindustrie leitet daraus die Annahme ab, Resistenzen gegen diese Substanzen stellen für Menschen kein Risiko dar. Aber Koevolution bedeutet, dass der Einsatz eines bestimmten Antibiotikums einen Selektionsdruck hin



PATRICK CAVAN BROWN



Auf einer Schweinefarm werden Jungtiere gegen ein Virus geimpft (links). Ein Schild warnt Besucher davor, das Gelände zu betreten, da sie die Tiere infizieren könnten (oben). Vier bis fünf Monate alte Schweine ruhen sich in ihren Pferchen aus (rechts).

zur Resistenz gegenüber einem anderen erzeugen kann. Zunehmende Resistenz gegenüber einem Wirkstoff für die Tierzucht könnte Mikroben somit auch unempfindlicher gegen Penizillin machen, um ein Beispiel zu nennen.

Alles andere als beruhigend wirken vor diesem Hintergrund neuere Studien, laut denen Bakterien, die mit Antibiotika in Berührung kommen, ihre resistenzvermittelnden Plasmide zunehmend öfter untereinander austauschen. Es wirkt geradezu so, als würden sich die Mikroben gegen einen gemeinsamen Feind verbünden und gegenseitig bewaffnen.

Behördliche Maßnahmen laufen ins Leere

Die amerikanische Behörde für Lebensmittel und Arzneien, FDA (Food and Drug Administration), hat in den zurückliegenden Jahren durchaus etwas unternommen, um das Problem anzugehen. Unter anderen hat sie unverbindliche Empfehlungen zum Einsatz von Antibiotika in der Landwirtschaft erarbeitet. Ihnen zufolge sollen veterinarpharmazeutische Unternehmen bei entsprechenden Wirkstoffen darauf hinweisen, diese dürften nicht allein für ein schnelleres Wachstum von Nutztieren, also als »Leistungsförderer«, eingesetzt werden. Zudem fordern die »Leitlinien« dazu auf, den rezeptfreien Verkauf solcher Mittel einzustellen, welche über Futter oder Wasser verabreicht werden (in den USA gibt es frei verkäufliche Antibiotika, die so genannten OTC-Produkte, von »Over The Counter«).

Die meisten Unternehmen sind mit diesen Empfehlungen einverstanden. Das Problem: Viele Viehzuchtbetriebe, einschließlich derer von Schoettmer und Beard, erklären, sie würden Antibiotika schon lange nicht mehr dafür nutzen, das Wachstum ihrer Nutztiere zu beschleunigen. Hauptsächlich würden sie diese Wirkstoffe jetzt einsetzen, um »Krankheiten vorzubeugen und diese zu kontrollieren«, was nicht unter die Leitlinien fällt. Solange Tierärzte zustimmen, können Züchter ihr Vieh immer noch massenhaft mit antimikrobiellen Substanzen behandeln, sobald sie

Infektionen fürchten. »Ein solcher Gebrauch ist in der Agrarindustrie ziemlich normal«, sagt Schoettmer, der 2015 vom National Pork Board zum Schweinezüchter des Jahres gekürt wurde. Das Gremium, ins Leben gerufen vom US-Kongress, soll die Agrarindustrie fördern und wird vom US-Landwirtschaftsministerium beaufsichtigt. Schoettmer fügt hinzu, das Ziel laute, »sicherzustellen, dass keines der verbreiteten Pathogene einen Ansatzpunkt findet, die Schweine krank zu machen.«

Laut Erhebungen des US-Landwirtschaftsministeriums von 2012 verfüttern fast 70 Prozent der amerikanischen Schweinemastbetriebe massenhaft antibiotische Substanzen, um Tierkrankheiten zu unterbinden. Praktisch kein Unternehmen kommt ganz ohne diese Wirkstoffe aus. Bei Rindern ist die Situation ähnlich: Mehr als 70 Prozent derjenigen, die in großen Zuchtbetrieben aufwachsen, erhalten medizinisch relevante Antibiotika. Bei Hühnern sind es zwischen 20 und 52 Prozent der gesunden Tiere. Landwirte, die einen Vertrag mit großen Unternehmen abgeschlossen haben, wissen oft gar nicht, dass sie ihrem Vieh solche Arzneien verabreichen, da sie vorbehandeltes Futter geliefert bekommen. Als ich Beard fragte, in welchem Alter seine Schweine Antibiotika erhalten, sagte er, er müsse sich bei TDM erkundigen.

Es leuchtet durchaus ein, dass Tiere in der Massenviehhaltung antimikrobiell behandelt werden müssen; ihre Lebensbedingungen machen sie für Krankheiten anfällig. »Das große Gedränge in den Ställen erschwert es sehr, Pathogene zu bekämpfen, und das Infektionsrisiko fällt entsprechend höher aus«, sagt Steve Dritz, Veterinärmediziner an der Kansas State University. Die Schweine, die ich selbst bei meinen Farmbesuchen sah, krochen und lagen übereinander; etliche wälzten sich in Fäkalien oder schnüffelten darin herum. In den zurückliegenden Jahrzehnten hat die Größe amerikanischer Schweinezuchtbetriebe enorm zugenommen: 1992 zogen nur 30 Prozent der Unternehmen mehr als 2000 Tiere gleichzeitig auf, 2009 traf dies bereits

Antibiotika in der Tierhaltung: Der Blick auf Deutschland

Im Jahr 2015 haben Pharmaunternehmen und Großhändler 805 Tonnen Antibiotika an Tierärzte in Deutschland geliefert, wie das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) mitteilt. Das wäre im Vergleich zu den Vorjahren ein deutlicher Rückgang (2011: 1706 Tonnen, 2014: 1238 Tonnen). Weil die meisten dieser Wirkstoffe für jeweils mehrere Tierarten zugelassen sind, lassen sie sich nicht einzelnen Spezies zuordnen. Etwa 92 Prozent der Präparate wurden oral verabreicht; rund sechs Prozent als Injektion oder Infusion; der Rest etwa als Sprays und Salben.

Den größten Anteil der Antibiotika in der Tiermedizin stellen Penizilline und Tetracykline. Das sind auch in der Humanmedizin die wichtigsten Wirkstoffe – vor allem im ambulanten Bereich, auf den rund 85 Prozent des Antibiotikaverbrauchs entfallen. Experten haben sich besorgt darüber geäußert, dass in Ställen auch Reserveantibiotika verabreicht werden sowie Wirkstoffe, die sowohl in der Human- als auch Tiermedizin eingesetzt und als »entscheidend wichtig« eingestuft werden, etwa Cephalosporine, Fluorchinolone und Makrolide. Insgesamt wendet die Humanmedizin in Deutschland jährlich 600 bis 700 Tonnen antimikrobielle Arzneistoffe auf, also weniger als der Veterinärbereich.

Wissenschaftlich belastbare Daten darüber, wie der Antibiotikaeinsatz in der Tiermedizin mit der Verbreitung resistenter Keime zusammenhängt, gibt es dem BVL zufolge bisher nicht. »Weder mit dem Erfassen von Abgabemengen noch mit dem Registrieren von Therapiehäufigkeiten lassen sich Verbrauchszahlen ermitteln, die mit den Resistenzdaten abgeglichen werden könnten«, sagt Andreas Tief, stellvertretender Pressesprecher beim BVL.

Davon unbenommen infizieren sich Menschen immer wieder durch bakteriell kontaminierte Lebensmittel. Meist handelt es sich bei den Keimen um Salmonellen, Campylobacter, Kolibakterien oder Listerien. Hinzu kommen methicillinresistente *Staphylococcus aureus* (MRSA) sowie *E. coli*, die gegen beta-Lactam-Antibiotika resistent sind (ESBL-*E. coli*). Roh verzehrtes Schweinefleisch, etwa Mett, ist eine bedeutende Quelle für Salmonellen- und Listerieninfektionen, frisches Hähnchenfleisch und Rohmilch enthalten oft Campylobacter und Listerien. Auch roher Fisch fällt gelegentlich durch hohen Listeriengehalt auf. MRSA besiedeln vor allem Geflügelfleisch (Hähnchen und Puten); das Gleiche gilt für ESBL-*E. coli*.

Keine Leistungsförderer

In der deutschen Tiermedizin sind alle zugelassenen Antibiotika-präparate verschreibungspflichtig. Bis auf eine Ausnahme dürfen sie nur zur Therapie bakterieller Infektionskrankheiten eingesetzt werden. Seit 2006 ist es in der EU verboten, dem Tierfutter antibiotische »Leistungsförderer« zuzusetzen, die das Wachstum beschleunigen oder die Futtermittelverwertung verbessern. Hierin spiegelt sich der im Artikel erwähnte härtere Kurs Europas, verglichen mit den USA. Möglicherweise hat er dazu beigetragen, dass in Deutschland – laut BVL und Robert Koch-Institut (RKI) – die Zahl gemeldeter MRSA-Infektionen beim Menschen seit Jahren rückläufig ist. Bei *S. aureus*-Isolaten aus Blutkulturen lag der MRSA-Anteil im Jahr 2010 bei 21 Prozent; 2013 waren es noch 12,8 Prozent. Dafür ist allerdings die Zahl der ESBL-*E. coli*-Infektionen deutlich angestiegen. Der Anteil an *E. coli*-Isolaten aus Blutkulturen kletterte von 1,7 Prozent im Jahr 2002 auf 10,5 Prozent im Jahr 2014.

Inwieweit eine antibiotikafreie Tierzucht möglich ist, beurteilt Andreas Tief differenziert: »Den Gebrauch dieser Wirkstoffe zu reduzieren, ohne hierzu begleitend ihren sachgerechten Einsatz sicherzustellen und die Tiergesundheit zu fördern, ist aus wissenschaftlicher Sicht nicht zielführend.« Impfungen könnten helfen, Antibiotikatherapien zu vermeiden, und seien diesen vorzuziehen. Jedenfalls sei es nicht akzeptabel, erkranktes Vieh lediglich symptomatisch zu behandeln, nur um antibiotikafreie Tiere zur Verfügung zu stellen. Seit 2014 müssten Halter von Masttieren (Schweinen, Ferkeln, Rindern, Kälbern, Hähnchen und Puten) alle Antibiotikaanwendungen halbjährlich an das Veterinäramt beziehungsweise eine zentrale Datenbank melden. Das BVL ermittle die Therapiehäufigkeiten für jeden Betrieb und jede Tiergruppe und veröffentliche sie im »Bundesanzeiger«. Allerdings wurde in der Presse berichtet, dass zahlreiche Betriebe keine Daten melden und die hieraus errechneten Kennzahlen deshalb fragwürdig seien.

Angaben des Statistischen Bundesamts belegen, dass die durchschnittliche Größe der deutschen Viehzuchtbetriebe zunimmt. 2013 gab es rund 200 000 Viehhaltende Betriebe; 2016 waren es noch 184 000. Der Tierbestand änderte sich jedoch in diesem Zeitraum wenig: Die Zahl der Rinder (derzeit 12,5 Millionen) und Schweine (28 Millionen) blieb nahezu gleich, die der Schafe (1,6 Millionen) ging um drei Prozent zurück. Die Nachfrage nach Fleisch aus ökologischer Haltung stieg unterdessen deutlich an. Während 2010 zirka 12 000 Betriebe ökologische Tierhaltung betrieben, taten dies 2016 bereits 17 000 Betriebe – 42 Prozent mehr.

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

auf 86 Prozent zu – größtenteils, weil viele kleine Betriebe aufgegeben hatten. Die Farmer stehen unter enormem wirtschaftlichem Druck. Die Preise für Mastschweine sind abgestürzt, und Unternehmen, die Verträge mit Geflügelzüchtern abschließen, bestehen darauf, dass diese ihre ohnehin schon teure Ausstattung regelmäßig auf eigene Kosten modernisieren. 2014 gaben nur 56 Prozent der mittelgroßen Betriebe an, dass sie mit ihrer Arbeit ein effektives Einkommen erzielen.

Unter diesen Gegebenheiten »müssten Landwirte im Grunde eine perfekte Unternehmensführung praktizieren und in einer absolut tadellosen Umgebung arbeiten, um den Ausbruch von Krankheiten zu verhindern«, erläutert Tim Johnson. »Es ist nicht die Schuld der Viehhalter, dass es so weit gekommen ist; die Industrie zwingt sie dazu.«

Keime und ihr Weg in den menschlichen Organismus

Wie groß ist das Risiko, sich durch den Verzehr von Schweinefleisch eine Infektion mit resistenten Erregern zuzuziehen? Beim Schlachten der Tiere gelangen häufig Bakterien aus ihrem Darm ins Fleisch. In einer Studie aus dem Jahr 2012 untersuchten Forscher der FDA landesweit rohes Fleisch, das im Einzelhandel verkauft wurde. Dabei stellte sich heraus, dass 84 Prozent der Geflügelbrüste, 82 Prozent des Putenfleischs, 69 Prozent des Rinderhacks und 44 Prozent der Schweinekoteletts mit intestinalen (aus dem Darm stammenden) *E.-coli*-Bakterien kontaminiert waren. Mehr als die Hälfte der Bakterien im Putenfleisch waren gegen mindestens drei Antibiotikaklassen resistent. Diese Mikroben können eine Lebensmittelvergiftung auslösen, wenn das Fleisch vor dem Verzehr nicht ausrei-

chend erhitzt wird oder eine Person, die damit hantiert, sich anschließend nicht richtig die Hände wäscht.

Lebensmittelpathogene können uns auch auf anderem Weg krank machen. Price und seine Kollegen haben *E.-coli*-Stämme untersucht, die er als COP (»Colonizing Opportunistic Pathogens«, kolonisierende opportunistische Pathogene) bezeichnet. Diese Bakterien gelangen normalerweise mit dem Essen in unseren Körper, lösen dort aber nicht sofort eine Infektion aus, sondern besiedeln den Darm zunächst nur wie die Milliarden anderen Einzeller des Mikrobioms. Erst später lösen sie Erkrankungen aus, etwa Infektionen der Harnwege. Zwischen 1999 und 2000 häuften sich im Umfeld der University of California, Berkeley, Harnwegsinfektionen bei Frauen, die von identischen *E.-coli*-Stämmen verursacht worden waren. Grund war vermutlich, dass die Frauen das gleiche kontaminierte Essen zu sich genommen hatten.

In den zurückliegenden Jahren ist es den CDC (Centers for Disease Control and Prevention, eine US-Gesundheitsbehörde) gelungen, die Quellen großer lebensmittelbedingter Krankheitsausbrüche rasch zu identifizieren. Bei schleichenden Infektionen, die sich über einen langen Zeitraum hinweg zusammenbrauen, ist das allerdings viel schwerer. Wer ein Mettbrötchen verzehrt, das mit arzneimittelresistenten COP kontaminiert ist, wird nie beweisen können, dass es jene schwere Infektion verursacht hat, die Monate später ausbricht. Wahrscheinlich wird er sich nicht einmal daran erinnern.

Es ist beinahe unmöglich zu klären, woher Infektionen mit resistenten Erregern kommen. »Vom Mastbetrieb zum Teller ist es ein langer Weg – geografisch und zeitlich«,

Auf den Seven Sons Farms in Indiana vertraut man darauf, dass viel Platz und Auslauf die Tiere vor Krankheiten schützen. Regulär werden hier dem Futter keine Antibiotika zugesetzt.



PATRICK CAVAN BROWN

erläutert Scott McEwen, Epidemiologe an der University of Guelph (Ontario, Kanada). Ein einziger Hamburger kann das Fleisch von 100 verschiedenen Kühen enthalten, was es enorm erschwert, bei einer Keimverseuchung die Quelle zu ermitteln. Forscher, die dem nachgehen, müssen überdies herausfinden, wie die betreffenden Tiere aufgezogen wurden, ob sie Antibiotika erhielten, und falls ja, wie lange, in welcher Dosis und aus welchem Grund. Weiterhin gilt es zu ermitteln, ob dies das Mikrobiom der Nutztiere in einer Weise verändert hat, die den Krankheitsausbruch begünstigte. Vertreter der Agrarindustrie behaupten, in Zuchtbetrieben verbreitete Bakterien stellten nur für Personal und Anwohner ein Risiko dar. Daher versuchen Wissenschaftler, Zugang zu den Anlagen zu bekommen, um die dortigen Mikroben mit jenen zu vergleichen, die größere Ausbrüche verursachen.

Doch noch sammelt niemand solche Informationen. »Es gibt nur sehr begrenzte Daten, die in einzelnen Unternehmen erhoben wurden«, räumt Bill Flynn ein, stellvertretender Direktor für Wissenschaftspolitik am Zentrum für Veterinärmedizin der FDA. Im September 2015 veranstalteten die FDA, das US-Landwirtschaftsministerium und die CDC einen Kongress, auf dem sie einen Plan ausarbeiteten, mehr Daten aus landwirtschaftlichen Betrieben zu erfassen. Aber sie erhielten nicht die erforderlichen Mittel, ihn umzusetzen. Tatsächlich sah die FDA 2016 keinen Cent jener 7,1 Millionen Dollar, die sie angefordert hatte, um Antibiotikaresistenzen bei Tieren zu untersuchen.

Ohne persönliche Beziehungen bekommen Wissenschaftler kaum Zugang zu Tierfarmen. Um Proben in

gel- und 48 Prozent der Schweinezüchter arbeiten unter Vertrag: Sie stehen in geschäftlicher Beziehung zu großen Unternehmen wie Tyson Foods, Smithfield Foods oder Perdue Farms und mästen für diese das Vieh. Züchter sind darauf angewiesen, da sie sich zunächst enorm verschulden müssen; der Aufbau eines Geflügel- oder Schweinemastbetriebs kostet einen Landwirt weit mehr als eine Million Dollar. Ohne Vertrag erzielen sie zudem kaum Gewinn, und oft genug haben sie dabei noch nicht einmal die Wahl zwischen verschiedenen Partnern, da es in ihrer Region nur ein einziges großes Unternehmen gibt.

Diese Verträge enthalten typischerweise Tierschutzbestimmungen, welche die Viehhalter dazu verpflichten, »Bewegungen von nicht wesentlichen Personen, Fahrzeugen und Geräten« in der Nähe der Betriebe einzuschränken. Als der Geflügelzüchter Mike Weaver vor ein paar Jahren einen Journalisten auf seine Farm einlud und sein Arbeitgeber davon erfuhr, musste Weaver an einer Nachschulung zu »biologischer Sicherheit« teilnehmen, was die Anlieferung neuer Tiere um zwei Wochen verzögerte und einen Einkommensverlust von 5000 Dollar bedeutete. Price wiederum berichtet, er habe verschiedene Viehhalter überreden können, ihm Zugang zu ihren Betrieben zu gewähren – worauf ihnen die Verträge gekündigt worden seien.

Datenmangel macht es leichter, gegen behördliche Regulierungen vorzugehen

Trotz mehrfacher Nachfrage haben sowohl die American Farm Bureau Federation, der größte US-Bauernverband, als auch die Smithfield Foods, der größte Schweinefleischproduzent in den USA, es abgelehnt, diesen Artikel zu kommentieren. Beide gaben keine Auskunft dazu, ob die Agrarindustrie es Forschern absichtlich verwehrt, Tierzuchtbetriebe zu betreten.

Der Mangel an einschlägigen Daten hat es der Industrie leicht gemacht, gegen behördliche Regulierungen anzugehen. 1977, kurz nachdem Levys schockierende Geflügelstudie erschienen war, gab die FDA bekannt, sie wolle aus Sicherheitsgründen für mehrere Antibiotika verbieten, diese an Tiere zu verfüttern. In den 40 Jahren, die seither vergangen sind, hat die Industrie diese Pläne vehement bekämpft. Das Argument: Es gebe keine stichhaltigen Beweise für eine drohende Gesundheitsgefahr. Schließlich änderte die FDA ihr Vorgehen und setzte unter anderem auf die erwähnten Leitlinien.

Den Verkauf von Antibiotika für die Tierzucht haben diese Empfehlungen nicht geschmälert. 2014 analysierte die unabhängige und gemeinnützige Nichtregierungsorganisation The Pew Charitable Trusts sämtliche 287 Antibiotikaerzeugnisse, die unter die Leitlinien fallen, und stellte fest, dass Züchter jedes vierte davon weiterhin in gleicher Dosierung und mit uneingeschränkter Behandlungsdauer verabreichen können – so lange, wie sie es für nötig erachten, um Krankheiten entgegenzuwirken.

Eine Verschreibungspflicht für Tierarzneimittel dürfte in den USA ohnehin wenig ändern. Viele Veterinärmediziner verschreiben und verkaufen Antibiotika mit Gewinn, oder sie arbeiten eng mit der Lebensmittel- beziehungsweise Pharmaindustrie zusammen. Laut einer Erhebung der



FOTOLIA / DECADE3D

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

industriellen Putenmastbetrieben zu sammeln, fragte Tara Smith bei jedem einzelnen registrierten Unternehmen in Iowa an. »Keines gewährte uns Zutritt«, erinnert sie sich. Mikrobiologe Lance Price und sein Team standen vor ähnlichen Problemen, als sie Mastschweine auf Bakterienbefall hin prüfen wollten. Da sie an keine lebenden Tiere herankamen, entschieden sie sich dafür, Schlachtern in North Carolina Schweineschnauzen abzukaufen und Abstriche davon zu nehmen. Und die bereits erwähnten Forscher der Johns Hopkins University, die Hühnertransportern hinterherfahren, taten das, weil sie keine andere Chance hatten, an die Tiere heranzukommen – ihnen war verboten worden, Zuchtanlagen zu betreten.

Viehhalter sind nicht grundsätzlich wissenschaftsfeindlich eingestellt, aber ihre Arbeitgeber, die Fleischverarbeitungsfirmen, halten sie dazu an, Fremden den Zutritt zu verwehren. Bis zu 95 Prozent der amerikanischen Geflü-

Nachrichtenagentur Reuters von 2014 hat jeder zweite Tierarzt, der die FDA in den zurückliegenden Jahren zum Antibiotikagebrauch bei Nutztieren beraten hat, Geld von Pharmaunternehmen erhalten. »Bei zahlreichen Veterinärmedizinern bestehen Interessenkonflikte, da sie mit großen Herstellern verbandelt sind«, sagt Infektionsmediziner James Johnson (siehe auch **Spektrum** Juni 2013, S. 30).

Auch bei Politikern scheinen solche Konflikte zu bestehen. Daten des gemeinnützigen und unabhängigen Center for Responsive Politics, das sich für Transparenz im Politikbetrieb einsetzt, belegen das. Demnach erhielt mehr als jedes zweite Mitglied, das im Unterausschuss für Gesundheitsfragen des United States House Committee on Energy and Commerce sitzt (eines ständigen Ausschusses des US-Repräsentantenhauses), jeweils mehr als 15000 Dollar von veterinärpharmazeutischen Unternehmen oder von Viehzuchtorganisationen.

Freilandhaltung mit viel Platz, Sonne und Wälzen im Schlamm

Von Beards Schweinezuchtbetrieb aus fahre ich rund zwei Stunden bis zu den Seven Sons Farms in Roanoke, Indiana. Hier werden ebenfalls Schweine aufgezogen. Früher arbeitete Seven Sons ganz ähnlich wie die Betriebe von Beard und Schoettmer, mit dem Mästen von jährlich 2300 Tieren und massivem Arzneimiteleinsatz. Doch die Betreiberfamilie sorgte sich zunehmend um die Gesundheitsrisiken dieser Praxis. 2000 wandelte sich Seven Sons zu einer so genannten regenerativen diversifizierten Farm. Heute teilen sich 400 Schweine, 2500 Legehennen und 120 Rinder eine Fläche von 220 Hektar. Die Schweine wachsen auf Weiden und in Wäldern auf – ohne Antibiotika.

Blaine Hitzfield, der zweite der sieben namensgebenden Söhne, nimmt mich mit auf eine Besichtigungstour. Es befinden sich nie mehr als ein Dutzend Schweine auf Arealen von rund 40 mal 50 Metern. Ich muss keine Schutzkleidung überziehen, und Hitzfield machte es nichts aus, dass ich direkt von einem anderen Mastbetrieb komme. Die Tiere auf seinem Hof, sagt er, seien widerstandsfähiger als solche, die in Massenställen aufwachsen. Sie hätten nicht nur mehr Platz und könnten sich mehr bewegen, sondern würden überdies später entwöhnt und profitierten deshalb von einem stärkeren Immunsystem. Eine Studie der Texas Tech University von 2007 gibt ihm Recht: Demnach sind bei Schweinen aus Freilandhaltung die Neutrophilen (spezialisierte Immunzellen) aktiver als bei Tieren aus der Stallzucht. Die naturnahe Umgebung wirke ebenfalls günstig. »Sonnenstrahlen sind ein wunderbares Desinfektionsmittel, und das Wälzen im Schlamm wirkt Parasitenbefall entgegen.« Natürlich kommt es auch bei Seven Sons vor, dass Schweine erkranken und mit Antibiotika behandelt werden müssen. Sie werden dann ohne Biosiegel auf Auktionen verkauft.

Hitzfield räumt ein, dass die Praxis bei Seven Sons kaum als Zukunftsmodell der gesamten industriellen Viehhaltung taugt. »Konventionelle Züchter meinen nicht zu Unrecht, dass sich dieser Ansatz nicht auf Großbetriebe ausweiten lässt.« Doch mit mehr Forschung sei ein Aufskalieren des Biolandbaus durchaus noch möglich. »Wir sind auf kleinen

Flächen in der Größenordnung eines Hektars heute weit produktiver, als wir es je zuvor waren.« Einige industrielle Zuchtbetriebe verändern sich bereits, vor allem weil die Verbraucher es verlangen. Sie werden damit noch lange nicht zu kleinen, diversifizierten Höfen. Aber im Februar 2016 gab das Unternehmen Perdue Farms bekannt, zwei Drittel seiner Hühner künftig ohne medizinisch relevante Antibiotika aufzuziehen. Und Tyson Foods hat versprochen, bis September 2017 auf den Einsatz humanmedizinischer Antibiotika in der Geflügelzucht zu verzichten.

Auch im Hinblick auf Schweinefleischprodukte wünschen die Konsumenten zunehmend eine Abkehr von exzessiver Massentierhaltung. »Einfach umzusetzen ist das zwar nicht«, sagt Bart Vittori, Geschäftsführer bei Perdue Foods. Dieses Unternehmen betreibt eine Sparte namens Coleman Natural Foods, in der Schweine rein pflanzlich und antibiotikafrei gemästet werden. »Doch die Nachfrage (nach bionäheren Produkten) ist da«, ergänzt Vittori, »unsere Kunden sind besser informiert und interessierter als je zuvor.« Bei Niman Ranch, einem Netzwerk von mehr als 725 Familienunternehmen, die Schweine, Lämmer, Rinder und Legehennen züchten, setzt man ebenfalls auf antibiotikafreie Haltung.

Erzeugnisse von Betrieben wie Coleman, Seven Sons und Niman Ranch können sich viele derzeit nicht leisten. Aber je mehr die Nachfrage nach antibiotikafreiem Fleisch steigt, umso größer wird das Angebot werden – und umso wahrscheinlicher ist es, dass die Preise fallen.

Wissenschaftler haben noch jede Menge Fragen zu Antibiotikaresistenzen, die sich vielleicht nie beantworten lassen, wenn die Agrarindustrie auch künftig den Zugang zu Betrieben verwehrt. Allerdings ist es immer offensichtlicher, dass der Einsatz antimikrobieller Wirkstoffe in der Viehhaltung dringend reduziert werden muss. An seine Stelle müssen neue Maßnahmen zur Infektionskontrolle treten – oder altbewährte Strategien, etwa den Tieren ausreichend Platz zu bieten. Bis solche Veränderungen flächendeckend greifen, wird die Massentierhaltung weiterhin superresistente Keime hervorbringen, gegen die unsere Medizin immer weniger ausrichten kann. ◀

QUELLEN

Ferguson, D. D. et al.: Detection of Airborne Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* Inside and Downwind of a Swine Building, and in Animal Feed: Potential Occupational, Animal Health, and Environmental Implications. In: Journal of Agromedicine 21, S. 149–153, 2016

Millman, J. M. et al.: Prevalence of Antibiotic-Resistant *E. coli* in Retail Chicken: Comparing Conventional, Organic, Kosher, and Raised without Antibiotics. In: F1000Research 2:155, 2013

Neyra, R. C. et al.: Multidrug-Resistant and Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) in Hog Slaughter and Processing Plant Workers and Their Community in North Carolina (USA). In: Environmental Health Perspectives 122, S. 471–477, 2014

Smith, T. C.: Livestock-Associated *Staphylococcus aureus*: The United States Experience. In: PLoS Pathogens 11, e1004564, 2015

Smith, T. C. et al.: Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* in Pigs and Farm Workers on Conventional and Antibiotic-Free Swine Farms in the USA. In: PLoS One 8, e63704, 2013

NATURSCHUTZ KAMPF FÜR AFRIKAS TIERWELT

Seit Jahrzehnten engagiert sich der berühmte Paläontologe und Anthropologe auch politisch an vorderster Front gegen die Wilderei für Stoßzähne in Kenia.

» spektrum.de/artikel/1461025

Am 30. April 2016 setzte Kenias Präsident ein Zeichen: Uhuru Kenyatta setzte die gesamten Lagerbestände des Landes an konfiszierten Elefantenstoßzähnen und Nashornhörnern in Brand. 105 Tonnen gewildertes Elfenbein und 1,3 Tonnen Horn gingen in Flammen auf – Ersteres 100, Letzteres 67 Millionen Dollar wert. Manche empfanden das bislang größte Event seiner Art wie eine Totenfeier für die mehr als 6000 Elefanten und 300 Nashörner, die ihr Leben hatten lassen müssen.

Vor allem aber sollte das Feuer demonstrieren, dass derartige Produkte für sich allein keinen Wert haben; dass sie nur kostbar sind, solange sie zu einem Tier gehören – weil die großen Tiere Afrikas Touristen ins Land holen und weil ohne sie das Ökosystem zusammenbricht.

Afrikas symbolträchtige Wildtiere verschwinden heutzutage in erschreckendem Tempo, größtenteils durch Wilderei. Die Zahl der Elefanten ging allein im letzten Jahrzehnt um 62 Prozent zurück. Gab es 1970 noch 70 000 Nashörner, so sind es heute lediglich 29 000. Die Löwenpopulationen schrumpften in den vergangenen 20 Jahren um 43 Prozent. Der Giraffenbestand, 1999 auf 140 000 geschätzt, beträgt mittlerweile nur noch 80 000 Tiere. Und so weiter.

Um dem Einhalt zu gebieten, ernannte Kenyatta im April 2015 Richard Leakey zum Vorsitzenden des Kenya Wildlife Service (KWS). Zum ersten Mal war Leakey 1989, in der Anfangszeit der Wildschutzbehörde, mit dieser Position betraut worden. Zuvor hatte er sich vor allem mit Entdeckungen früher menschlicher Fossilien, insbesondere am Turkanasee, einen Namen gemacht. Nun verschaffte er sich rasch Reputation als unnachgiebiger, unbestechlicher Verfechter seiner neuen Aufgabe. Doch 1994 trat er zurück, da er Mitgliedern der Regierung von Präsident Daniel arap Moi Korruption vorwarf.

Heute sind die Wildtierbestände Afrikas allerdings noch massiver bedroht als damals schon, geschuldet der boomenden Nachfrage nach Elfenbein- und Nashornpulver in Ostasien. Noch nie war der Druck von Seiten der organisierten Kriminalität auf Elefanten und andere Arten dermaßen intensiv. »Scientific American« führte dieses Interview 2016 an der Stony Brook University auf Long Island. Dort hat Leakey eine Professur am von ihm gegründeten Turkana Basin Institute inne, das anthropologische und archäologische Forschungen in der Region des Turkanasees durchführt.

Die Redaktion



GETTY IMAGES / AFP / TONY KARUMBA

Richard E. F. Leakey

- ▶ Geboren 1944 in Nairobi als Sohn der Paläoanthropologen Louis S. B. und Mary D. Leakey, die unter anderem die ersten Fossilien von *Homo habilis* ausgruben.
- ▶ Schon als Kind begleitete Leakey seine Eltern auf Ausgrabungen und fand wertvolle Fossilien. Dennoch wollte er zunächst nicht in ihre Fußstapfen treten.
- ▶ In den 1960er Jahren entdeckte er in Kenia neue Fossilfundstätten und leitete dort Ausgrabungen. Berühmt ist etwa das Skelett eines *Homo-erectus*-Jungen vom Turkkanasee.
- ▶ Leakey holte in England seinen Schulabschluss nach und begann ein Paläontologiestudium, das er aber abbrach.
- ▶ 1974 bis 1989 war er Direktor des Nationalmuseums von Kenia.
- ▶ Seit 1989 hatte er verschiedene Posten im Naturschutz und bei der Regierung Kenias inne.

Herr Leakey, Sie stammen aus einer Familie berühmter Paläontologen, die in Ostafrika spektakuläre frühmenschliche Fossilien fanden, und haben selbst wertvolle Schädel und Skelette entdeckt. Warum engagieren Sie sich nun an vorderster Front im Naturschutz?

Richard Leakey: Als Fossilienforscher hatte ich es mit Arten zu tun, die wegen Klimaveränderung ausstarben oder einem hohen Jagddruck nicht standhielten. Sich heute in Kenias großartiger Natur aufzuhalten, inmitten von Nachfahren jener Tiere – jetzt natürlich anderen Arten –, das bewegt mich schon mächtig. Ich fühle mich diesen Kreaturen stark verbunden. Und ich lerne mich selbst zu begreifen, meinen Platz im Kreislauf des Lebens zu sehen. Deshalb ist die Paläontologie für mich von wilden Tieren nicht zu trennen, sie ist Teil von ihnen.

Als Leiter des Kenya Wildlife Service von 1989 bis 1994 griffen Sie gegen die Korruption hart und erfolgreich durch. Ihren Rangern gaben Sie Waffen, auch um auf Wilderer notfalls zu schießen und dem damaligen Boom der Elfenbeinwilderei Einhalt gebieten zu können.

Wir mussten irgendwie den Markt treffen. Ich hatte die Idee, konfiszierte Stoßzähne in einer Aufsehen erregenden Aktion zu verbrennen. Das machte öffentlich bewusst, dass die Elefanten wegen ihrer Stoßzähne umgebracht werden. Das Washingtoner Artenschutzabkommen CITES (*Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora; Anm. d. Red.*) verhängte daraufhin ein internationales Verbot des Elfenbeinhandels, mit großem Erfolg: Vorher hatten in Kenia jährlich tausende Elefanten ihr Leben lassen müssen; Ende der 1990er Jahre waren es nur mehr ungefähr 100. Dieses niedrige Niveau hielt sich mindestens zehn Jahre lang.

Wieso konnte die Wilderei später wieder dermaßen zunehmen?

Eine Menge beschlagnahmter Stoßzähne wurde damals noch an verschiedensten Orten gelagert. Einige Länder – vor allem Südafrika, aber auch etwa Botswana, Namibia und Simbabwe – wollten dieses Elfenbein gern zu Geld machen. Sie vermochten CITES zu überzeugen, es vermarkten zu dürfen. Wir in Kenia hatten dagegen Vorbehalte, denn wir fürchteten, es würde schwierig sein, legale Exportpapiere von gefälschten zu unterscheiden. Tatsächlich hat die Wilderei daraufhin wieder extrem zugenommen. Die Preise sind rasant in die Höhe gegangen, und große kriminelle Organisationen sind eingestiegen. Die Lage entwickelte sich verheerender denn je.

Deswegen hat man Sie nun gebeten, die Leitung des KWS nochmals zu übernehmen. Wieso haben Sie den Posten angenommen?

Der Präsident hat dem Vorstand und mir große Entscheidungsfreiräume zugesagt. Er versprach uns, dass wir von politischer Seite nicht von korrupten Beamten ausgebremst würden. Die Moral im Wildlife Service war abgrundtief schlecht. Das ändert sich nun. Inzwischen sehen wir, dass die Leute das Richtige tun, denn sie fühlen sich sicher und in ihrer Arbeit nicht mehr behindert. Im Verlauf von elf Monaten 2015/2016 verlor Kenia 94 Elefanten – im gleichen Zeitraum des Jahres davor waren es mehrere hundert. Wir haben Kenias Wildlife Act überarbeitet, um das Management im Wildlife Service zu straffen. Außerdem konnten wir 1000 zusätzliche Ranger anheuern, und die Strafen für Wilderei wurden verschärft. Nun sind wir dabei, Juristen speziell für solche Strafprozesse einzustellen und einzuarbeiten. Unsere Leute bekommen neue Autos, die Straßen werden ausgebessert, die Ranger



Am 30. April 2016 wurden im Nairobi-Nationalpark 6000 Stoßzähne verbrannt – als Signal für den Kampf gegen den Elfenbeinschmuggel.

erhalten akzeptable Unterkünfte im Busch, medizinische Versorgung und eine neue Ausrüstung.

Wichtig für solch ein Projekt ist auch das Einverständnis der Anwohner. Wie gewinnen Sie die Menschen?

Große Medienunternehmen wie »National Geographic« und »BBC« produzieren seit Jahrzehnten Dokumentationen über die afrikanische Wildnis. Außerhalb Afrikas sind diese Filme bekannt und beliebt. Aber keiner davon ist jemals in Kenia gelaufen, nie! Die von mir gegründete Wohltätigkeitsorganisation WildlifeDirect brachte einige der Firmen dazu, uns diese Reportagen kostenlos zur Verfügung zu stellen. Seit Januar 2016 zeigt das Fernsehen in Kenia sie nun jeden Samstagabend um 20 Uhr. Danach erzielt das Thema in den sozialen Medien regelmäßig größte Aufmerksamkeit. WildlifeDirect produziert auch »NTV Wild Talk«, die ersten von Afrikanern selbst über ihre wilden Tiere gedrehten Filme. Die werden dienstags abends ausgestrahlt. Bald wird es in Kenia viele Leute geben, die diese Tierwelt genauso lieben, wie die Menschen in London, Paris oder New York es tun.

Wildreservate in Afrika werden oft damit gerechtfertigt, dass sie den Tourismus beleben und darüber Geld bringen. Denkt der KWS auch so?

Den Kenianern wird langsam bewusst, dass es auf eine ganz neue Einstellung zur Wildnis ankommt. Momentan zählt Tourismus noch als wichtiges Element unserer wirtschaftlichen Zukunft. Doch diese Sparte ist unbeständig und dürfte bestenfalls mittelfristig nützlich sein. Langfristig wird die Industrie zur wirtschaftlichen Entwicklung des Staats am meisten beitragen. Andererseits merken inzwischen viele, dass jedes Land naturbelassene Gegenden braucht, wo man noch durchatmen und Schönheit erfahren kann. Ihre unberührte Natur betrachten die Kenianer als unschätzbbares nationales Erbe. Langfristig wird diese Haltung für die Nationalparks viel mehr Bedeutung haben als der Tourismus.

Was ist mit der ländlichen Bevölkerung, die sich mit gefährlichen Wildtieren konfrontiert sieht?

Die Bevölkerung Kenias hat sich seit Mitte der 1970er Jahre auf fast 48 Millionen verdreifacht. Die Menschen besiedeln daher zunehmend Gebiete, wo gefährliche Tiere leben. Immer wieder fallen Leute Elefanten, Büffeln oder Krokodilen zum Opfer; oder Felder werden verwüstet. Das Ganze ist also keineswegs frei von Spannungen und Interessenkonflikten. Ich plädiere dafür, die Nationalparks einzuzäunen, damit die Wildtiere nicht zu den Farmen gelangen und umgekehrt die Ziegen und Rinder der Hirten nicht in die Schutzgebiete.

Das klingt ziemlich radikal.

Ja, aber vielleicht ist das der einzige Weg, der funktioniert. Technologisch gesehen sind solche Zäune inzwischen sehr effektiv, allerdings sind sie auch sehr teuer. Wir streben niedrig verzinsten Darlehen von multinationalen Institutionen wie der Weltbank an, die in Raten über 30 Jahre zurückzahlen sind. Solche Zäune würden auch die Kontrolle der Wilderei erheblich erleichtern. Denn viele Wilderer geben sich als Hirten aus, die angeblich mit ihrer Herde im Nationalpark umherziehen. Die Errichtung der Zäune dürfte drei bis fünf Jahre dauern. Dann wird man sagen: »Prima!« – und nicht mehr wie im Moment: »Ihr seid ja verrückt.«

In Kenia sieht die ländliche Bevölkerung von den Einnahmen aus dem Wildtiertourismus nicht viel. In Namibia und Botswana unterstützen die Anwohner das Betreiben von Reservaten, weil Gelder davon an sie gehen. Brauchen Sie in Kenia die Normalbürger nicht auf Ihrer Seite?

Doch, unbedingt! Nur, soll man es so machen, dass die Leute, die am Rand eines Schutzgebiets leben, Unterstützung erhalten und ihre Kinder zur Schule schicken können, solange der Tourismus gerade boomt? Und wenn er abflaut, müssten sie die Kinder wieder von der Schule neh-

men? Ich finde, dieses Geld sollte der Regierung zur Verfügung stehen, und die soll es zur Verbesserung von Krankenhäusern, Straßen und überhaupt der Infrastruktur im ganzen Land verwenden.

Empfinden Sie es nicht als Konflikt, Regierungsgelder zum Schutz der wilden Tiere einzusetzen, angesichts so vieler armer Menschen in Kenia?

Zu meiner Zeit als Kabinettsmitglied der kenianischen Regierung (1999 bis 2001, *Anm. d. Red.*) ging jeder einzelne Haushaltsposten über meinen Schreibtisch. Viele ehemalige Kollegen aus dem Naturschutz fragten an: »Könntest du unser Budget nicht ein ganz klein wenig aufstocken? Das würde uns enorm helfen.« Immer war meine Antwort: »Nein, moralisch geht das gar nicht. So viele Kinder gehen nicht zur Schule, so viele Menschen sind nicht geimpft, haben kaum Zugang zu Wasser, oft nicht einmal ein richtiges Dach über dem Kopf. Da kann ich absolut nichts für Wildreservate abzweigen.« Das waren für mich zwei harte Jahre.

Nun liegen Ihre Befugnisse wieder auf der anderen Seite.

Ja, doch ich weiß gut, wie wichtig es ist, vor allem den Menschen zu helfen. Wenn es nicht gelingt, die Armut zu bekämpfen, gibt es in unserer Gesellschaft keinerlei Sicherheit, für niemanden und nichts, weder institutionell noch auf nationaler Ebene – auch definitiv nicht für die Natur und die wilden Tiere. Aufgabe der Nationalparks ist es, dass sie allen zum Vorteil gereichen. Das heißt, die mit ihnen erwirtschafteten Gelder müssen eingesetzt werden, um allen Kenianern zu besserer Bildung, besseren Straßen, einer besseren Infrastruktur und einem längeren, gesünderen Leben zu verhelfen.

Die Hafenstadt Mombasa, Kenias zweitgrößte Stadt, dürfte immer noch den illegalen Export von Elfenbein von Ostafrika nach Asien anführen. Was unternimmt die Regierung des Landes dagegen?

Das meiste von diesem Elfenbein kommt heute nicht aus Kenia, sondern zum Beispiel aus Tansania oder aus zentralafrikanischen Ländern. Als erstes Ziel hatte ich mir gesetzt, die Wilderei von Elefanten in Kenia zu unterbinden. Das ist weitgehend gelungen. Den Schmuggel zu stoppen, liegt nicht im Aufgabenbereich des KWS. Maßnahmen gegen die Missstände in Mombasa laufen aber und machen gute Fortschritte. Kürzlich hat die Hafenbehörde auf sämtlichen Ebenen Mitarbeiter ausgewechselt. Die Zollabfertigungseinheit ist komplett neu besetzt, ebenso die Mannschaft für die Container und die für die Docks.

Tansania, Kenias Nachbarland im Süden, plant eine große Verbindungsstraße durch die Serengeti. Als Folge dessen sagen Umweltschützer das Ende der größten Tierwanderzüge der Erde voraus. Sie selbst befürworten diese Schnellstraße dennoch.

Die Serengeti ist ein fantastisches Ökosystem. Sie muss um jeden Preis erhalten bleiben. Aber wir sollten das

realistisch angehen. Rund um die Serengeti wachsen die Ansiedlungen. Diese neue Straße soll Städten zugutekommen, die voraussichtlich zu einer Metropolregion von mindestens drei Millionen Menschen heranwachsen werden. Tansania will in den nächsten zehn Jahren einen zweiten Hafen bauen. Dabei hat das Land den Handel mit den zentralafrikanischen Ländern im Blick, wie Kenia übrigens auch, und dazu braucht man eine Straße. Also ja, ich unterstütze einen Transportkorridor durch die Serengeti. Aber 40 Kilometer davon sollten in 30 Meter Höhe auf Brücken verlaufen, damit zweimal im Jahr die großen jährlichen Tierwanderungen hier weiterhin stattfinden können.

Was macht Ihnen für die Zukunft von Afrikas Tierwelt am meisten Sorgen?

Der Klimawandel. Aus der Paläontologie weiß man: Bei Klimaveränderungen verschwinden auf Inseln lebende Arten zuerst, lange bevor es diejenigen auf dem Festland trifft. Ich fürchte, mit unserem Bevölkerungswachstum und dem planlosen Geschehen rund um die Nationalparks schaffen wir bereits »Inseln der Wildnis«. Die Tiere können ja nirgends hin. Wenn die Wasserlöcher in einem Nationalpark bei anhaltender Dürre austrocknen, können sie nirgendwohin ausweichen. Ich weiß wirklich nicht, was wir machen werden, wenn das Klima trockener wird.

Brad Pitt wird Sie in einem Film über Ihr Leben verkörpern. Wie finden Sie das?

Ich habe mir immer einen Film gewünscht, der die Misere der Elefanten und Nashörner aufzeigt. Wenn die Menschen sehen, wie ein Brad Pitt für diese Tiere kämpft, werden ihm Millionen von Menschen Glauben schenken – auch in China.

Sie meinen, Brad Pitt als Richard Leakey hat mehr Einfluss als Richard Leakey selbst?

Aber sicher – 1000-mal mehr! ◀

Die Fragen stellte **Richard Schiffman**, Umweltjournalist in New York.



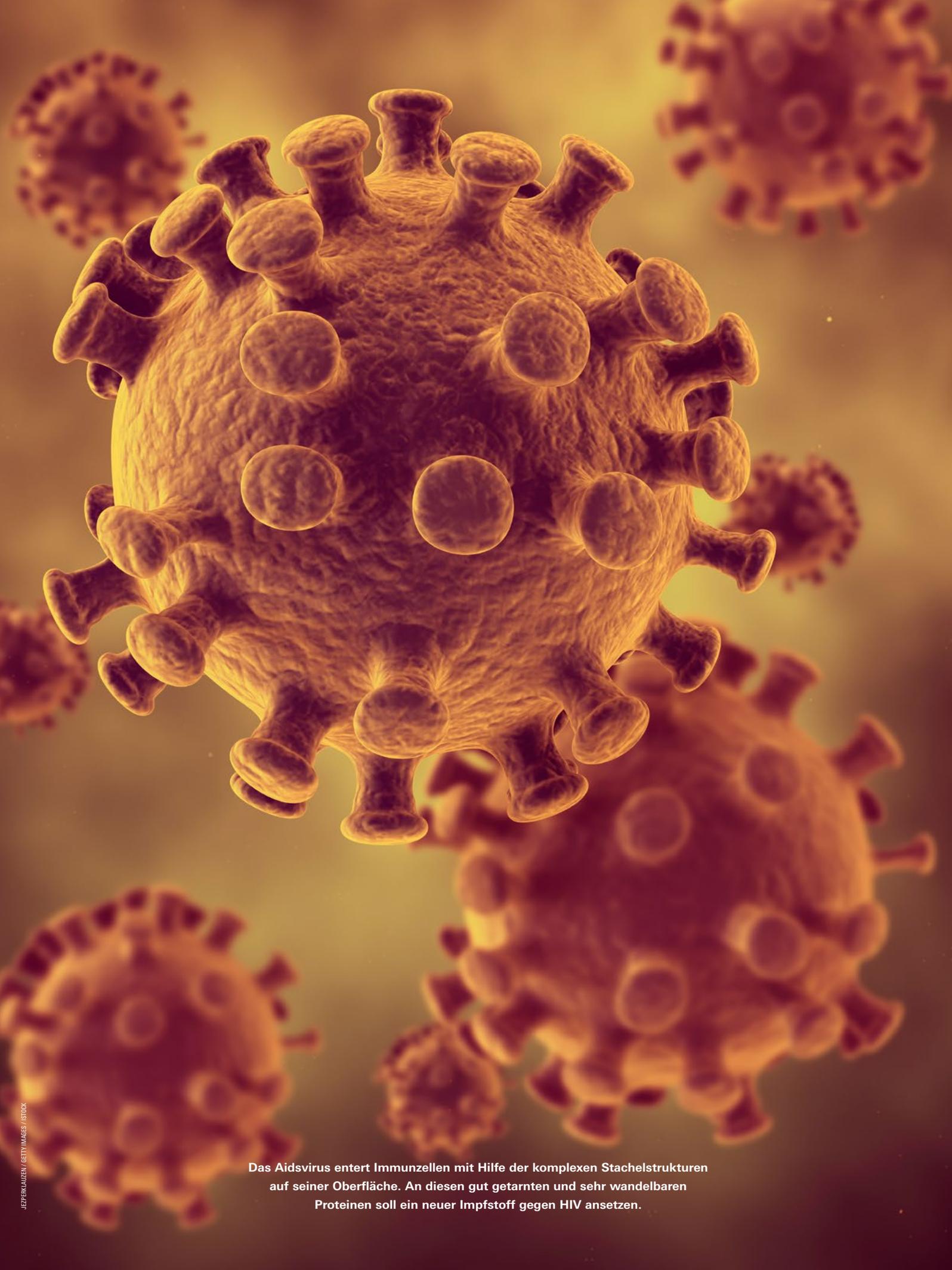
QUELLE

Weru, S.: Wildlife Protection and Trafficking Assessment in Kenya: Drivers and Trends of Transnational Wildlife Crime in Kenya and its Role as a Transit Point for Trafficked Species in East Africa. TRAFFIC Report, Mai 2016

LITERATURTIPPS

Leakey, R., Morell, V.: Wildlife. Ein Leben für die Elefanten. Fischer, Frankfurt am Main 2002
Richard Leakey berichtet von seinem Einsatz gegen die Jagd nach Stoßzähnen.

Wasser, S. K. et al.: Die Spur der Elfenbeinschmuggler. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2010, S. 78–85
Forscher bestimmen die Herkunft von Stoßzähnen mit DNA-Analysen.



Das Aidsvirus entert Immunzellen mit Hilfe der komplexen Stachelstrukturen auf seiner Oberfläche. An diesen gut getarnten und sehr wandelbaren Proteinen soll ein neuer Impfstoff gegen HIV ansetzen.

MEDIZIN

DIE ACHILLESFERSE DES AIDSVIRUS

Auf Basis eines manipulierten Oberflächenmoleküls des HI-Virus wollen Wissenschaftler endlich den ersehnten, breit wirkenden Impfstoff gegen den tödlichen Erreger herstellen.



Rogier W. Sanders (links) ist Professor für Virologie am Academisch Medisch Centrum Universiteit van Amsterdam und Fakultätsmitglied des Weill Cornell Medical College der Cornell University in New York. **Ian A. Wilson** (Mitte) leitet auf einer Professur am Scripps Research Institute (TSRI) in La Jolla (Kalifornien) das Institut für Integrierte Strukturbiochemie und Bioinformatik. **John P. Moore** hat am Weill Cornell Medical College eine Professur für Mikrobiologie und Immunologie inne.

» spektrum.de/artikel/1461027

► Eine Infektion mit dem Aids-Erreger HIV ist heutzutage kein automatisches Todesurteil mehr; sie lässt sich mit Medikamenten über Jahrzehnte recht gut kontrollieren. Doch eine effektive Impfung gegen das Virus steht noch immer aus – mehr als 30 Jahre nach seiner Entdeckung in den 1980er Jahren. Schuld daran sind keineswegs zu geringe Forschungsanstrengungen oder Geldmittel für die Entwicklung eines Impfstoffs. Vielmehr hatten es die Mediziner noch nie mit einem so vertrackten Virus zu tun. Denn dieser Erreger versteht es zum einen besser als jeder andere, sich vor den Abwehrkräften des Körpers immer wieder neu zu tarnen. Und zum anderen befällt und vernichtet das Virus ausgerechnet jene Immunzellen, welche die Verteidigung normalerweise koordinieren.

Ein guter Impfstoff gegen HIV wäre besonders für viele Länder der Dritten Welt dringend notwendig, wo es aus verschiedenen Gründen oft an der richtigen medizinischen Versorgung und konsequenten Behandlung mangelt. Gerade in diesen Ländern beginnt eine Therapie oft erst, wenn das Virus das Immunsystem bereits stark geschwächt hat und die typischen Folgeerkrankungen auftreten. Anfangs, über Monate oder sogar Jahre, kann die Infektion fast unbemerkt bleiben – bis sich schließlich Aids, das Vollbild der Immunschwächekrankheit, entwickelt hat, das unbehandelt zum Tod führt.

Ein effektiver Impfstoff würde dem Immunsystem ermöglichen, das eindringende Virus schnell zu erkennen und zu beseitigen, bevor es die Zellen befällt und sich im Körper ausbreitet. Eine Hauptschwierigkeit ist dabei die rasche Wandlungsfähigkeit dieses Erregers. Die Vakzine

müsste gleichzeitig gegen die vielen, auch immer wieder neuen Varianten immunisieren. Nach fast 20 Jahren Forschung glauben wir, einen Weg gefunden zu haben, die bisherigen Hürden zu überwinden: mit Hilfe eines von unseren Teams entwickelten künstlichen Proteins, das einem komplexen Molekül des HIV-Erregers ähnelt.

Bei Tieren vermag dieses synthetische Molekül eine starke Immunreaktion gegen HIV auszulösen. Um als Ausgangssubstanz eines Impfstoffs für Menschen herzuhalten, wird man es allerdings noch weiter abwandeln müssen. Vor allem sollte die mit diesem Protein hervorge-

AUF EINEN BLICK HIV-IMPfung IN SICHT

- 1** Die Behandlung von HIV-Infektionen hat große Fortschritte gemacht. Doch einen sicheren Impfstoff mit Breitbandwirkung zu entwickeln, gelang noch nicht.
- 2** Das Protein der Virushülle, das sich dafür anbietet, zerfällt zu leicht, ist bestens getarnt, und seine Einzelteile provozieren das Immunsystem nicht genug.
- 3** Anhand des Vorbilds haben die Autoren ein Kunstmolekül entwickelt, das bei Tieren eine Immunität hervorruft und das in Studien auch menschliche gegen HIV gerichtete Antikörper erkennen.

rufene Immunität noch stärker werden und ein viel breiteres Spektrum von Virusstämmen treffen als derzeit.

Das von uns konstruierte Protein ahmt eine äußere Struktur – ein so genanntes Hüllprotein – des HI-Virus nach, das Env (von envelope, also »Hülle«) heißt. Aus der Virusoberfläche ragen die Env-Proteine wie kleine Stacheln heraus. Mit ihrer Hilfe entert der Erreger bestimmte Immunzellen, nämlich CD4+-T-Lymphozyten (siehe »Vision eines Aidsimpfstoffs«, rechts). Normalerweise kommunizieren diese T-Zellen mit anderen Teilen des Immunsystems. Dazu benutzen sie verschiedene Proteine, darunter zwei Moleküle namens CD4 und CCR5, die auf ihrer Oberfläche sitzen wie Signaltürme in einer Festungsmauer.

Um in eine Immunzelle einzudringen, heftet sich das Virus zunächst mit einem Env-Protein an ein CD4-Protein der T-Zelle. Dieses ermöglicht es ihm daraufhin, sich auch noch an ein CCR5-Protein zu binden. Nun verdreht sich das Env-Protein und ordnet sich derart um, dass die Außenmembranen von Erreger und Immunzelle miteinander verschmelzen. Dann entlässt das Virus seine Gene in die Zelle, woraufhin diese Milliarden Kopien erzeugt. Schließlich bricht die Immunzelle auf, die Virusteilchen kommen frei und erobern weitere Zellen.

Seit Langem hegen Forscher den Wunschtraum, das HI-Virus durch Blockieren seiner Enterhaken außer Gefecht zu setzen. Am besten müsste man dazu dem Immunsystem beibringen, spezifische Antikörper zu bilden, welche die Env-Proteine erkennen und sich daran festheften. Gelänge das, wäre damit Zweierlei erreicht: Erstens würden die Antikörper quasi eine Barriere zwischen Env und den genannten Außenproteinen der T-Zellen bilden, so dass der Kontakt vom Virus zur Immunzelle unterbliebe; und zweitens könnten die Antikörper dafür sorgen, dass

Die Standardmethode der Impfstoffentwicklung gegen Viren eignet sich für HIV leider nicht – weil das isolierte Hüllprotein zerfällt

andere Komponenten des Immunsystems das Virus vernichten. Nach diesem Schema funktionieren Impfstoffe gegen andere Viren, etwa gegen den Hepatitis-B-Erreger. Wenn in jenen Fällen virale Oberflächenproteine gentechnisch im Labor hergestellt werden und der Rest des Erregers fehlt, bildet die Vakzine keine Infektionsgefahr. Trotzdem regen sie das Immunsystem zur Produktion von Antikörpern an, die später im Ernstfall eingreifen und die Abwehrkräfte gegen alles mobilisieren, was einigermaßen nach diesem Oberflächenprotein aussieht oder sich damit schmückt.

Die bewährte Standardmethode der Impfstoffentwicklung gegen Viren eignet sich für HIV leider nicht. Denn sobald man dessen Hüllproteine vom Virus trennt, zerfällt die komplex aufgebaute Stachelstruktur in mehrere Komponenten. Unter den Bruchstücken sind die Proteine

gp120 und gp41 (die vom selben Gen herrühren): Ersteres Protein stellt jene Untereinheit des Hüllproteins dar, mit der Env am CD4 der T-Zelle andockt; letzteres verankert Env in der Virusmembran und begünstigt später die Verschmelzung von Virus- und Immunzellmembran.

Wieso ist die Zerfallsneigung des Hüllproteins ein so großes Hindernis bei der Impfstoffentwicklung gegen HIV? Schließlich produziert das Immunsystem ja auch Antikörper gegen einzeln vorliegende gp120-Moleküle – und diese Proteine sind für das Andockmanöver unverzichtbar. Seit Jahren versuchen Forscher ein HIV-Vakzin auf gp120-Basis zu entwickeln, bisher ohne Erfolg. Denn leider bewirken die betreffenden Antikörper im Menschen keine starke Immunantwort gegen das Virus selbst. Andererseits lassen Studien mit kompletten Env-Proteinen annehmen, dass auf das vollständige Hüllprotein gerichtete Antikörper wesentlich besser dazu geeignet wären, HI-Viren zu markieren und damit der Zerstörung im Körper auszuliefern.

Das erste ferne Ziel:

Ein stabiles, immunogenes Hüllprotein

Im Jahr 1998 entschied deswegen einer von uns (Moore), diesen Weg ins Auge zu fassen, also auf einen Impfstoff mit dem ganzen Hüllprotein zu setzen. Kurz darauf schlossen sich die beiden anderen von uns dem Projekt an, zuerst Sanders und bald auch Wilson. Dass ein solches Vorhaben aus vielen Gründen reichlich schwierig sein würde, war uns bewusst. Beachtlich ist schon der komplexe Aufbau dieses Proteins: Ein komplettes Env ist ein Trimer aus je drei gp120- und gp41-Komponenten (ein Verbund aus dreimal der Kombination gp120 und gp41).

Ein effektiver, vorbeugender HIV-Impfstoff müsste eine Reihe grundsätzlicher Ansprüche erfüllen. So sollte er das Immunsystem möglichst dazu bringen, eine ganz bestimmte Sorte von Antikörpern herzustellen, die zwei Aufgaben zugleich erfüllen: Sie müssten sowohl das komplette Virus erkennen – in dem Fall speziell am Hüllprotein Env – als auch sich derart an den Erreger anlagern, dass sie sein Eindringen in Zellen verhindern. Beides leisten neutralisierende Antikörper, die wie der Name besagt die Infektionsfähigkeit eines Virus neutralisieren.

Im Fall von HIV genügt es aber leider noch nicht, solche Antikörper gegen lediglich das eine Hüllprotein herzustellen, mit dem geimpft wird. Dafür mutiert das Aidsvirus zu stark, und gerade sein Stachelmolekül verändert sich laufend. Die nach der Impfung vorhandenen Antikörper erkennen mutierte Varianten dann nicht mehr. Aus dem Grund müsste ein HIV-Impfstoff neutralisierende Antikörper erzeugen, die von vornherein eine große Bandbreite von Hüllproteinen aufspüren – und dabei möglichst neu auftretende Varianten mit abdecken. Vereinfacht gesagt müsste eine wirkungsvolle Vakzine ein breites Spektrum an Aidsviren lahmlegen. Idealerweise wären jene Breitbandantikörper auf solche Teile von Env ausgerichtet, die sich bei den Virusstämmen nur wenig unterscheiden, also kaum mutieren. Noch besser wäre es vermutlich, wenn die Antikörper gleichzeitig auf mehrere Komponenten des Hüllproteins ansprächen.

Vision eines Aidsimpfstoffs

Ein Impfstoff gegen HIV müsste hochwirksame Antikörper mit Breitenwirkung gegen das Virushüllprotein Env produzieren. Denn mit diesem komplexen Molekül (A) dockt das Virus an Immunzellen an (B), in denen es sich vermehrt.

menschliche Immunzelle
CD4-Rezeptor (blau)
CCR5-Rezeptor (lila)

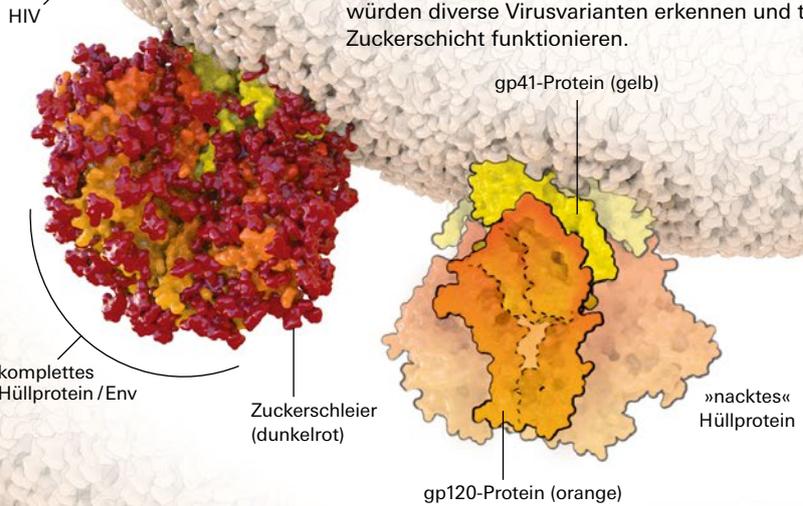
B Entern verhindern

Mit Hilfe des Hüllproteins Env infiziert HIV Immunzellen. Dazu benutzt es deren Rezeptoren CD4 und CCR5. Neutralisierende Antikörper, die sich an Env anlagern, könnten den Vorgang unterbinden.

Das HI-Virus macht es dem Immunsystem aber auch deswegen außerordentlich schwer, weil sich die Hüllproteine unter einer ungewöhnlich dicken Schicht an ihnen hängender Zuckermoleküle verstecken. Zwar kommt bei einer unbehandelten Infektion durchaus eine Immunantwort zu Stande, wobei ebenfalls neutralisierende Antikörper entstehen, und diese Reaktion des Organismus hält die Virusvermehrung einige Jahre lang in Grenzen. Doch der Prozess ist zu langsam und zu schwach, um das Virus völlig auszumerzen. Und bis endlich neutralisierende Antikörper entstehen, die es schaffen, die tarnende Zu-

A Zielstruktur des Impfstoffs

Das Env-Protein tarnt sich mit Zuckern (linke Kugel). Env selbst stellt ein Trimer aus je drei Komponenten von gp41 und gp120 dar (»nacktes« Protein, rechts). Künstlich abgewandelt soll das Trimer als Impfstoff die Bildung von Breitbandantikörpern gegen diverse HIV-Stämme anregen. Das heißt: Geeignete Antikörper würden diverse Virusvarianten erkennen und trotz der Zuckerschicht funktionieren.



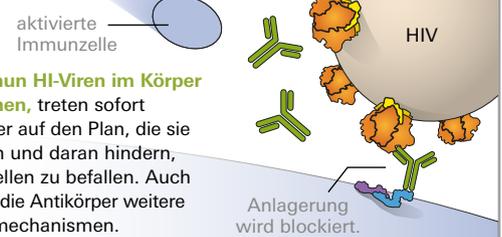
Der Idealfall:

Da Teilstücke von Env die Hoffnungen nicht erfüllen, setzen die Forscher auf das ganze Trimer. Damit das isolierte, komplexe Protein nicht zerfällt, mussten sie es verändern. Inzwischen prüfen sie, welche künstlichen Varianten sich am besten zur Erzeugung genügend effektiver Antikörper eignen.

1 Das betreffende synthetische Trimer wird in einen Organismus injiziert.

2 Das Immunsystem erzeugt daraufhin Antikörper gegen das Trimer, die bei einer Infektion auch auf alle natürlichen Env-Varianten reagieren können.

3 Sobald nun HI-Viren im Körper auftauchen, treten sofort Antikörper auf den Plan, die sie abfangen und daran hindern, Immunzellen zu befallen. Auch initiieren die Antikörper weitere Abwehrmechanismen.



ckerschicht zu durchdringen oder als solche zu erkennen, können Monate oder Jahre verstreichen. Bis dahin hat das Aidsvirus genügend Zeit, eine wichtige Fraktion der Immunzellen nach und nach zu dezimieren, die zu verlieren der Organismus sich nicht leisten kann.

Fast zwei Jahrzehnte und zahllose Versuche haben wir gebraucht, um schließlich ein Trimer von Env zu gewin-

FALCONERI VISUALS / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2016; KASTEN IMPFSCHEMA: JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2016

nen, welches unsere beiden wichtigsten Kriterien erfüllt: nicht zu zerfallen und die Bildung neutralisierender Antikörper gegen vorherrschende HIV-Stämme anzuregen. Diese Studien haben die National Institutes of Health (NIH) der USA finanziert.

Zunächst isolierten wir aus einem bestimmten Virusstamm Gene für Env und synthetisierten mit ihrer Hilfe Hüllproteine. Dabei beseitigten wir den Molekülteil, der das Hüllprotein normalerweise an der Oberfläche von HIV verankert. Das erste derart erzeugte Protein zerfiel. Andere Forschergruppen versuchten, diese Schwierigkeit zu beheben, indem sie den Proteinkomplex gentechnisch so abwandeln, dass die Komponenten besser zusammenhalten mussten – was auch einigermaßen gelang. Allerdings ähnelten jene stabileren Moleküle dem ursprünglichen Hüllprotein des Virus jetzt nicht mehr genug, um eine Bildung der erforderlichen Antikörper gegen HIV auszulösen.

SOSIP: Synthetisches Hüllprotein mit Schwefelverstrebnungen und vertauschten Aminosäuren

Wir fanden es nun an der Zeit, uns andere Viren genauer anzuschauen, die HIV strukturell ähneln. Vielleicht würden uns deren Hüllproteine Anhaltspunkte liefern, wie wir das isolierte Env stabiler bekämen. Dabei fiel uns auf: Die Oberflächenproteine mancher Viren enthalten eine Art chemische Verstrebung: Moleküle, die dem gp120 und gp41 von HIV entsprechen, sind hier miteinander über zwei Schwefelatome (eine Disulfidbrücke) verbunden. Also suchten wir nach Stellen an unseren synthetischen Hüllproteinen, wo wir solche Schwefelbrücken anbringen konnten.

Dabei machten wir uns zu Nutze, was man bereits über die Zusammenlagerung von gp120 und gp41 im Trimer

taufte wir SOSIP. SOS steht für die Schwefelverstrebnung, IP für den Aminosäuretausch.

Doch viel weiter als bis hierhin kamen wir in den nächsten Jahren nicht. Denn leider verklumpten unsere nunmehr stabilen Trimere, wenn wir sie in eine Flüssigkeit gaben – was zur Impfstoffherstellung notwendig ist. Somit waren auch diese Moleküle nutzlos.

Zwei entscheidende Entwicklungen brachten uns endlich weiter. Die erste nahm ihren Anfang, als Andrew Ward vom Scripps Institute in La Jolla (Kalifornien) mitzuhelfen begann, die physische Struktur des Env-Trimers aufzuklären. Ward erzeugte sehr detaillierte elektronenmikroskopische Fotos unserer SOSIP-Trimere. Diese Bilder zeigten, dass die manipulierten Moleküle sich leicht an Fettkügelchen – Lipidvesikel – heften. Das macht sie so klebrig, dass sie wie Kaugummi zusammenklumpen. Wie wir nun erkannten, sah nur ein Teil der künstlichen Trimere wie Virushüllproteine aus. Andere kamen in sehr merkwürdigen Formen daher. Offensichtlich war es uns nicht gelungen, durchgehend gute, einheitliche Imitate der Env-Proteine zu erzeugen.

An den elektronenmikroskopischen Aufnahmen orientierten wir uns, als wir nun darangingen, den störenden Abschnitt am Ende unserer Moleküle zu kappen, an den sich die lästigen Lipide binden. Wir durchtrennten die Trimere an der 664. Position ihrer Aminosäureketten und nannten die leicht gekürzte Version deswegen SOSIP.664. Davon machte Ward wiederum Aufnahmen. Und zu unserer Freude sahen alle diese Moleküle den auf dem HI-Virus sitzenden Stacheln recht ähnlich, soweit diese außen sichtbar sind.

Ganz am Ziel waren wir damit immer noch nicht. Denn das SOSIP.664 entsprach mit seinen Aminosäuren nur dem Hüllprotein einer bestimmten Variante eines bestimmten HIV-Stamms. Für einen Impfstoff mit breiter Wirkung wollten wir aber ein Trimer konstruieren, welches das menschliche Immunsystem zur Produktion neutralisierender Antikörper gegen diverse HIV-Stämme anregt.

Breit wirkende neutralisierende Antikörper von HIV-Patienten im Labortest

Wie das letztlich gelingen könnte, weiß bis heute niemand genau. Am ehesten dürften wir hierbei wohl weiterkommen, wenn wir zunächst in Labortests sicherstellen, dass von HIV-Patienten stammende, breit wirkende neutralisierende Antikörper die künstlichen Trimere überhaupt erkennen. Tatsächlich hat man solche Immunmoleküle von einigen Menschen gewonnen, die seit Jahren mit verschiedenen Stämmen der Viren infiziert sind.

Falls sich also ein derartiger Antikörper an ein bestimmtes künstliches Trimer anheftet, würde das bedeuten, dass das Kunstmolekül den natürlichen Env-Vorbildern biochemisch genügend ähnelt. Dann könnte sich das betreffende synthetische Trimer für einen vorbeugenden Impfstoff eignen, der bei noch nicht mit HIV infizierten effektive neutralisierende Antikörper gegen mehrere Virusstämme oder -varianten entstehen lässt.

Doch welche Aminosäurezusammensetzung des Env-Proteins für einen Breitbandimpfstoff geeignet wäre, ließ



ISTOCK / LUKASZ MARTYNOWICZ

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/hiv-und-aids

wusste. Durch Herumprobieren fanden wir dann auch passende Stellen. Das manipulierte Trimer zerfiel allerdings immer noch, nur in anderer Weise als vorher.

Als Nächstes veränderten wir ein wenig die gp41-Komponente des Hüllproteins von HIV. Proteine bestehen aus Ketten von Aminosäuren, deren elektrische Ladungen ihre endgültige räumliche Gestalt beeinflussen. Durch Austausch bestimmter Aminosäuren zwang Sanders das gp41 in immer wieder neue, leicht veränderte Formen. Schließlich hatte er Erfolg: Als er an einer bestimmten Stelle die Aminosäure Isoleucin durch Prolin ersetzte, hielt das Trimer endlich zusammen. Das umgestaltete Protein

sich nicht ohne Weiteres erkennen. Uns blieb deshalb nichts anderes übrig, als die Hüllproteine von rund 100 verschiedenen HI-Virusstämmen durchzumustern. Zu jedem einzelnen dieser Stachelmoleküle stellten wir ein SOSIP-Protein her. Dann schauten wir, ob eines davon im Elektronenmikroskop so aussah wie der außen sitzende Teil eines normalen Hüllproteins. Aber würde dieses Molekül außerdem mit den neutralisierenden Breitbandantikörpern der HIV-Patienten reagieren?

Ein viel versprechendes natürliches Env von einem afrikanischen Kind

Ein passendes natürliches Env, das beide Vorgaben erfüllte, fanden wir schließlich in Virusproben mit dem Code BG505 von einem sechs Wochen alten Säugling aus Nairobi in Kenia, der HIV-infiziert zur Welt gekommen war. Den betreffenden Virusstamm hatten Julie Overbaugh vom Fred Hutchinson Cancer Research Center in Seattle (US-Bundesstaat Washington) und ihre Kollegen von der Universität Nairobi isoliert. Die Daten von dessen genetischer Sequenz erhielten wir von der International AIDS Vaccine Initiative (IAVI).

Die zweite Entwicklung, die uns weiterhalf, betraf eine neue Methode, um dieses besondere Trimer – kurz BG505 genannt (für BG505 SOSIP.664) – in großer Menge und möglichst reiner Form herzustellen. Nun konnten wir sogar Kristalle des Proteins erzeugen und daran seine Molekülstruktur mittels Röntgenstrahlen aufklären. Und wir würden zukünftig genug Material haben, um damit Tests an Tieren und später vielleicht an Menschen durchzuführen.

Erst einmal injizierten wir Kaninchen und Affen die synthetischen BG505-Trimere und gewannen die daraufhin von den Tieren gebildeten Antikörper. Diese gaben wir zu menschlichen Zellkulturen – und tatsächlich bewahrten sie die Zellen vor einer Infektion mit dem BG505-Virus, leider aber nicht vor der Ansteckung mit anderen HIV-Stämmen. Die letztlich angezielte breite neutralisierende Wirkung vermittelten jene Antikörper somit nicht, doch unser Ergebnis war immerhin ein guter Anfang.

Einer der weiteren Schritte muss sein, die Experimente an Menschen zu wiederholen. Unsere bisherigen Forschungen zur Proteinerzeugung haben großteils die Bill & Melinda Gates Foundation und IAVI finanziert. Mit IAVI und den NIH sind wir auch im Gespräch wegen der Konzeption und Finanzierung einer ersten »erkundenden« klinischen Studie mit ungefähr 50 Freiwilligen. Mit dem besagten künstlichen Trimer werden wir gewiss nicht direkt einen vorbeugenden Impfstoff gegen HIV entwickeln können – auf jeden Fall nicht mit dessen jetziger Konfiguration. Tierversuche sagen zwar oft ziemlich gut voraus, wie der menschliche Organismus vermutlich reagieren wird, doch völlig zuverlässig sind deren Ergebnisse nicht. Erst klinische Studien an Menschen können zeigen, wie unser Immunsystem auf die künstlichen Trimere antwortet.

Diese zukünftigen Ergebnisse – zusammen mit Daten aus Wilsons Labor, wie stark die Kunstprodukte natürlichen Hüllproteinen von HIV ähneln – werden dazu dienen, unsere Proteine für den gewünschten Zweck noch weiter zu verbessern. Bis das Ziel endlich erreicht sein wird,

müssen wir an ihnen vermutlich noch einige deutliche Änderungen vornehmen. Für die günstigste Art der Verabreichung schon vorhandener und neuer Trimere an Menschen werden wir außerdem aktuelle Erkenntnisse darüber verwerten, wie unser Immunsystem eigentlich breit wirkende neutralisierende Antikörper bildet.

Im Wesentlichen haben wir bisher einen funktionierenden Prototyp der ersten Generation entwickelt. Diesen können wir nun unterschiedlich abwandeln, damit wir erkennen, welche Konfiguration die wirksamsten Antikörper

Ein guter Anfang: In der Zellkultur schützen gegen unsere synthetischen Trimere gerichtete Breitbandantikörper vor einer Infektion

liefert. Ob es schließlich gelingen wird, den gewünschten Breitbandimpfstoff gegen die hauptsächlichsten HIV-Stämme herzustellen, ist noch keineswegs sicher. Doch auf Grund der guten Ergebnisse bei Tieren und Zellkulturen erscheint eine Lösung mit unserem Ansatz möglich.

Immerhin stehen jetzt das Werkzeugarsenal und die Methodik bereit, um die bestmöglichen Env-SOSIP-Moleküle für eine HIV-Vakzine zu entwickeln. Diverse Wissenschaftlerteams arbeiten ihrerseits an veränderten Versionen der Virusstacheln und verfolgen damit weitere Impfstoffansätze. Nach langen frustrierenden Anstrengungen könnte ein Aidsimpfstoff in den nächsten Jahren endlich in Reichweite kommen. ◀

QUELLEN

Fauci, A. S.: An HIV Vaccine: Mapping Uncharted Territory. In: *Journal of the American Medical Association* 316, S. 143–144, 2016

Haynes, B. F., Burton, D. R.: Developing an HIV Vaccine. In: *Science* 355, S. 1129–1130, 2017

Medina-Ramirez, M. et al.: Stabilized HIV-1 Envelope Glycoprotein Trimers for Vaccine Use. In: *Current Opinion in HIV and AIDS* 12, S. 241–249, 2017

Sanders, R. W. et al.: A Next-Generation Cleaved, Soluble HIV-1 Env Trimer, BG505 SOSIP.664, Expresses Multiple Epitopes for Broadly Neutralizing but not Non-Neutralizing Antibodies. In: *PLoS Pathogens* 9, e1003618, 2013

LITERATURTIPPS

Seuchen auf dem Vormarsch. **Spektrum** der Wissenschaft **Spezial** Biologie, Medizin, Hirnforschung 2/2015
Darin zwei Artikel über Mutationen, die vor Aids schützen

25 Jahre HIV-Forschung. In: **Spektrum** 11/2009, S. 54–67
Zwei Beiträge zur Molekularstruktur des HI-Virus und den Schwierigkeiten der Impfstoffentwicklung

WEBLINK

www.niaid.nih.gov/topics/hivaids/research/vaccines
Website des US-National Institute of Allergy and Infectious Diseases zur Impfstoffforschung gegen HIV

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN FARBENSPIELE MIT POPPING BOBAS

Chemische Reaktionen werden gewöhnlich in Reagenz- und Bechergläsern oder mitunter recht komplizierten Apparaturen durchgeführt. Doch es geht auch ganz einfach und faszinierend zugleich: in Bubble-Tea-Bällchen!



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

► [spektrum.de/artikel/1461029](https://www.spektrum.de/artikel/1461029)

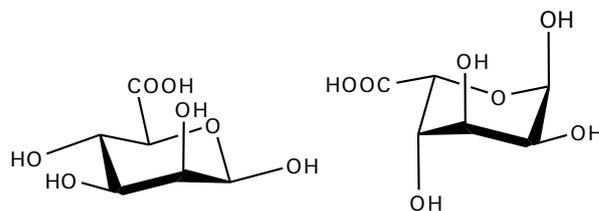


► Vor wenigen Jahren schossen sie wie Pilze aus dem Boden: Verkaufsstellen von so genanntem Bubble Tea. Das Faszinierende an diesem stark gesüßten Mixgetränk aus Tee, Milch und Fruchtsirup sind farbige, im Innern flüssige Kügelchen, Popping Bobas genannt, die beim Kauen zerplatzen (Bild rechts oben). Doch beschern sie nicht nur ausgefallene Gaumenfreuden, sondern bestechen auch durch die reizvolle Chemie, die in ihnen steckt – oder sich mit ihnen treiben lässt. Interessant ist allein schon die Frage nach den molekularen Vorgängen bei ihrer Bildung. Aber ganz besonderen Spaß verspricht die Möglichkeit, chemische Reaktionen ins Innere der Alginatbällchen zu verlagern. Auf diese Weise gelingt es, mit einfachen Mitteln verblüffende Experimente zu Hause durchzuführen!

Vielseitiges Naturprodukt

Alginsäure ist das strukturgebende Molekül der Zellwände von Braunalgen, aus denen der britische Chemiker und Pharmazeut Edward C. C. Stanford (1837–1899) die Substanz schon 1880 erstmals gewinnen konnte. Heutzutage werden Alginsäure und ihre Salze, die Alginat, im Maßstab von 40 000 Tonnen pro Jahr produziert. Verwendung finden sie unter anderem in der Lebensmittelindustrie als Emulgatoren, Gelier-, Überzugs- und Verdickungsmittel sowie in der Medizin als Wundauflage oder Abformmasse.

Chemisch gesehen ist Alginsäure ein Biopolymer. Als Polymere bezeichnet man langkettige Moleküle, die aus einer oder mehreren sich stetig wiederholenden Struktur-



Alginsäure ist ein Biopolymer aus Braunalgen, in dem bis zu 3000 Exemplare zweier Zuckereinheiten aneinandergereiht sind. Dabei handelt es sich um β -D-Mannuronsäure (links) und α -L-Guluronsäure (rechts).

einheiten aufgebaut sind. Genauer gesagt gehört Alginsäure wie Stärke oder Cellulose zu den Polysacchariden. Anders als diese, welche nur aus Glukoseeinheiten bestehen, setzt sie sich allerdings aus zwei unterschiedlichen Bausteinen zusammen (Bild oben), der α -L-Guluronsäure (abgekürzt G) und der β -D-Mannuronsäure (M). Beide sind so genannte Zuckersäuren, die bei der Oxidation von Zuckermolekülen entstehen. In einzelnen Alginsäuremolekülen hängen bis zu 3000 von ihnen aneinander. Dabei wechseln sie sich keineswegs immer schön regelmäßig ab. Vielmehr existieren auch Bereiche, in denen viele G- oder M-Bausteine direkt aufeinander folgen: Chemiker sprechen von GG- und MM-Blöcken.

Zur Herstellung von Popping Bobas dient wegen der besseren Wasserlöslichkeit nicht Alginsäure, sondern ihr Natriumsalz, das Natriumalginat, in dem das Proton (H^+)



Bubble Tea, ein Mixgetränk aus Tee, Milch und Fruchtsirup, enthält als Besonderheit so genannte Popping Bobas, die beim Kauen zerplatzen. Diese gallertartigen, flüssigkeitsgefüllten Bällchen (unten) haben eine Hülle aus Calciumalginat.



OBEN: EXCLUSIVE-DESIGN / STOCK.ADOBE.COM;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT;
KLEINES FOTO RECHTS: MATTHIAS DUCCI

der Carboxylat-Gruppen ($-\text{COOH}$) durch ein Natriumion (Na^+) ersetzt ist. In Gegenwart von Ionen bestimmter Metalle wie etwa Calcium verfestigen sich wässrige Natriumalginat-Lösungen zu einer glibberigen, geleeartigen Masse. Bei dieser Gelierung verflechten sich die fadenförmigen Einzelketten zu dreidimensionalen Gebilden. Der Grund dafür ist, dass sich die Metall-Ionen insbesondere in den GG-Blöcken einlagern. Denn diese bilden mit ihrer Zickzackstruktur passende Hohlräume, wenn sich zwei von ihnen aneinanderlegen (Bild rechts unten).

Bubble-Tea-Bällchen durch Gelierung

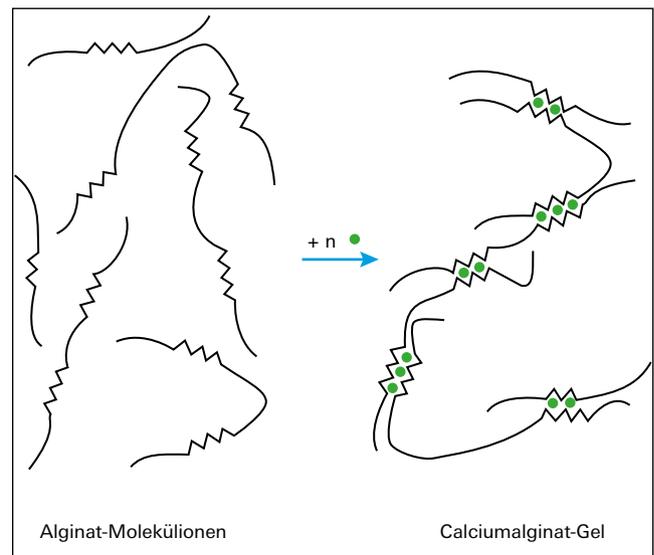
Der Gelierprozess lässt sich ausnutzen, um Popping Bobas herzustellen. Wenn man eine wässrige Natriumalginat-Lösung tropfenweise zu einer Calciumsalz-Lösung gibt, bildet jeder Tropfen beim Eintauchen sofort einen schwer löslichen, stabilen Mantel aus Calciumalginat. Im Innern bleibt dagegen ein wenig flüssige Natriumalginat-Lösung eingeschlossen. Weil die Calcium-Ionen durch den Mantel diffundieren können, verfestigt sich auch dieser Flüssig-

Alginatlösungen gelieren bei Zugabe von Calcium-Ionen (grüne Punkte). Diese sorgen dafür, dass sich Bereiche des Biopolymers aneinanderlegen, in denen mehrere Guluronsäure-Einheiten direkt aufeinander folgen, und lagern sich in die dabei entstehenden Hohlräume (symbolisiert durch Zickzacklinien) ein.

keitsrest allerdings innerhalb weniger Minuten, wenn man die Bällchen in der Calciumsalz-Lösung belässt. Man sollte sie deshalb möglichst rasch daraus entfernen.

Bei unseren Experimenten schleusen wir Stoffe in die Alginatbällchen ein und lassen sie dort miteinander reagieren. Dabei treten teils beeindruckende Farbeffekte auf.

Zur Vorbereitung der Versuche geben Sie ein Gramm Natriumalginat, das Sie über das Internet beziehen können, in ein Glasgefäß (zum Beispiel ein 100-Milliliter-Becher-



MATTHIAS DUCCI



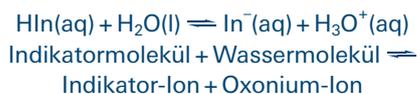
Alginatebällchen mit eingeschlossenem pH-Indikator aus einem Testset der Firma JBL sind unterschiedlich gefärbt, je nachdem, ob sie sich in einem sauren, neutralen oder alkalischen Medium befinden (von links nach rechts).

glas) und fügen 50 Milliliter heißes, aber nicht mehr siedendes Wasser hinzu. Rühren Sie anschließend fünf bis zehn Minuten lang kräftig mit einem Glasstab, bis sich alles vollständig gelöst hat. Diese Lösung reicht für sämtliche hier beschriebenen Experimente. Denken Sie bitte daran, beim Hantieren mit heißen Lösungen und Chemikalien stets eine Schutzbrille und gegebenenfalls Schutzhandschuhe zu tragen.

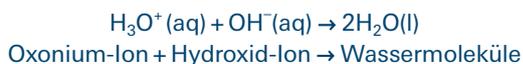
Experimente mit pH-Indikatoren

Für den ersten Versuch verwenden wir einen pH-Indikator, der durch seine Farbe anzeigt, ob eine Lösung sauer oder alkalisch ist. Meist handelt es sich um eine organische Verbindung, die ein positiv geladenes Wasserstoffion, also ein Proton (H^+), abspalten und auf ein Wassermolekül übertragen kann, wobei ein so genanntes Oxoniumion (H_3O^+) entsteht. Wir wollen dafür kurz HIn schreiben, wobei »H« das Elementsymbol für Wasserstoff ist, während »In« für den Rest des Indikatormoleküls steht.

In Wasser bildet sich das folgende chemische Gleichgewicht aus (die Kürzel (aq) und (l) bedeuten »in Wasser gelöst« beziehungsweise »flüssig«):



Durch die Übertragung des Protons ändert der Indikator seine Farbe, Methylorange zum Beispiel von Rot nach Gelb. Wenn Sie diesen Indikator in eine saure Lösung geben – also eine, die viele Oxonium-Ionen enthält –, dann liegt er überwiegend in der HIn-Form vor, weil sich das oben formulierte Gleichgewicht nach links verschiebt. Deshalb ist die Lösung rot gefärbt. In alkalischen Lösungen kommen dagegen zahlreiche Hydroxid-Ionen (OH^-) vor, die mit Oxonium-Ionen zu Wasser reagieren.



Als Folge davon werden die Oxonium-Ionen gemäß der obigen Gleichgewichtsreaktion ständig nachgebildet, wobei das HIn sein Proton abgibt und in die In^- -Form übergeht. Darum ist eine alkalische Lösung mit Methylorange gelb gefärbt. Chemische Umsetzungen, bei denen Protonen übertragen werden, bezeichnet man ganz allgemein als Säure-Base-Reaktionen.

Als besonders geeignet für unsere Experimente hat sich das pH-Testset (3,0–10,0) von JBL erwiesen (zu beziehen beispielsweise bei Kölle-Zoo). Darin enthalten ist auch ein 20-Milliliter-Messbecher, in den Sie fünf Milliliter Natriumalginate-Lösung füllen. Fügen Sie anschließend 40 Tropfen der Indikatorlösung sowie zwei Milliliter Wasser hinzu und verrühren Sie das grün gefärbte Gemisch mit einem Glasstab.

Nun lösen Sie ein Gramm Calciumlactat (erhältlich im Internet) in 50 Milliliter Wasser und geben mit einer Pipette einzeln nacheinander 40 bis 60 Tropfen der Indikatoralginate-Lösung hinzu. Dabei entstehen grüne Bällchen. Gießen Sie die Lösung durch ein feines Teesieb und stellen Sie es, nachdem Sie die darin aufgefangenen Kügelchen mit Wasser abgespült haben, zum Entfernen des restlichen Spülwassers auf saugfähiges Haushaltspapier. Schließlich verteilen Sie die Alginatebällchen auf drei Zehn-Milliliter-Rollrandgläsern (Tablettengläser), die Sie zuvor je zur Hälfte mit einer Flüssigkeit gefüllt haben: das erste mit Essig, das zweite mit purem Wasser und das dritte mit Wasser, in dem eine Messerspitze Haushalts soda (Na_2CO_3) gelöst ist. Wie von Geisterhand färben sich die Alginatebällchen im Essig rot und in der Sodalösung lila, während sie im neutralen Wasser ihr grünes Aussehen behalten (Bild oben).

Verantwortlich für die Farbänderungen sind die Oxonium-Ionen in der sauren sowie die Hydroxid-Ionen in der alkalischen Lösung, die durch den Calciumalginate-Mantel diffundieren können. Im Innern der Alginatebällchen bewirken sie dann die oben beschriebenen Verschiebungen in der Gleichgewichtsreaktion zwischen Wasser und pH-Indikator. Dieser besteht in unserem Fall aus einem Gemisch mehrerer Substanzen, das im sauren Milieu rot, im alkalischen violett und im neutralen grün erscheint.

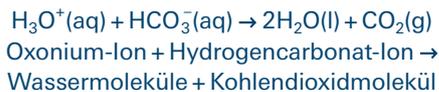
Die Wirkung von »Brausegas« auf Indikator-Alginatebällchen

Ein weiterer verblüffender Farbeffekt ergibt sich, wenn Sie die grünen Bällchen mit Kohlendioxid (CO_2) in Kontakt bringen – jenem Gas, das im Alltag meist fälschlich als Kohlensäure bezeichnet wird und Sprudelwasser oder Limonade so schön auf der Zunge prickeln lässt. Geben Sie dazu eine Vitaminbrausetablette in ein 100-Milliliter-Becherglas mit 10 Milliliter Wasser und decken Sie es lose mit einem Stück Pappe ab. Die Tablette enthält unter anderem Natriumhydrogencarbonat ($NaHCO_3$), besser bekannt als Natron, sowie Zitronensäure. Letztere bildet in Wasser Oxonium-Ionen, die mit dem Hydrogencarbonat-



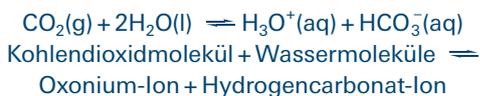
Beim Versetzen mit Kohlendioxid ändern die Alginatbällchen mit eingeschlossenem pH-Indikator von JBL ihre Farbe von Grün nach Gelb.

Ion (HCO_3^-) des Natrons zu Kohlendioxid und Wasser reagieren. Deshalb löst sich die Tablette schäumend auf. Die entsprechende Reaktionsgleichung lautet (der Zusatz (g) steht für »gasförmig«):



Das freigesetzte Kohlendioxid ist schwerer als Luft und verbleibt daher in dem mit Pappe abgedeckten Becherglas. Gießen Sie es, nachdem sich die Tablette vollständig aufgelöst hat, behutsam in ein Rollrandglas mit 20 grünen Alginatbällchen und verschließen Sie dieses mit einem Gummistopfen. Nach etwa einer halben Minute haben sich die Kügelchen gelb verfärbt (Bild oben)!

Wie ist das zu erklären? Wenn das Kohlendioxid mit der feuchten Oberfläche der Alginatbällchen in Berührung kommt, bilden sich gemäß der Reaktionsgleichung



Oxonium-Ionen. Diese wandern mit der Zeit ins Innere der Bällchen. Allerdings reagiert nur ein kleiner Teil der Koh-

lendioxidmoleküle: Es stellt sich ein chemisches Gleichgewicht ein, das weit auf der linken Seite liegt. Dadurch wird die Lösung im Innern der Bällchen lediglich sehr schwach sauer. Der Indikator färbt sich daher nicht rot, sondern nur gelb.

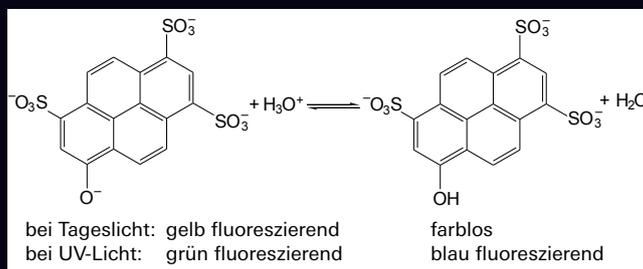
Faszinierende Effekte mit Textmarkern und Zaubermalern

Mit einem Farbumschlag reagiert auch das in diversen Alltagsprodukten enthaltene Pyranin auf eine Änderung der Konzentration von Wasserstoff-Ionen in einer Lösung. Es fluoresziert bei Tageslicht gelb und wird deshalb in manchen Textmarkern oder neuerdings auch teilweise in Duschgels verwendet. Um diesen pH-Indikator in die Alginatbällchen einzuschleusen, bemalen Sie ein etwa drei mal fünf Zentimeter großes Stück Filterpapier beidseitig mit einem gelben Textmarker von Herlitz, Faber Castell oder Pelikan. Anschließend bewegen Sie es in fünf Milliliter Wasser hin und her, bis sich der größte Teil des Farbstoffs gelöst hat. Nach Zugabe von fünf Millilitern Natriumalginat-Lösung tropfen Sie den Extrakt wie üblich in eine Calciumlactat-Lösung. Beim Bestrahlen mit einer UV-Taschenlampe bieten die entstehenden gelben Bällchen einen spektakulären Anblick: Sie fluoreszieren intensiv grün (links im Bild unten)!

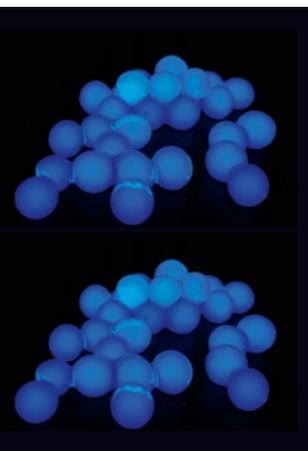
Wenn Sie die Alginatbällchen in eine stark saure Lösung überführen, entfärben sie sich. Das Pyranin liegt nämlich nun protoniert vor, hat also ein Wasserstoff-Ion angelagert. Doch wer die farblosen Kügelchen unter UV-Licht betrachtet, erlebt eine Überraschung: Sie fluoreszieren jetzt blau (rechts im Bild unten)!

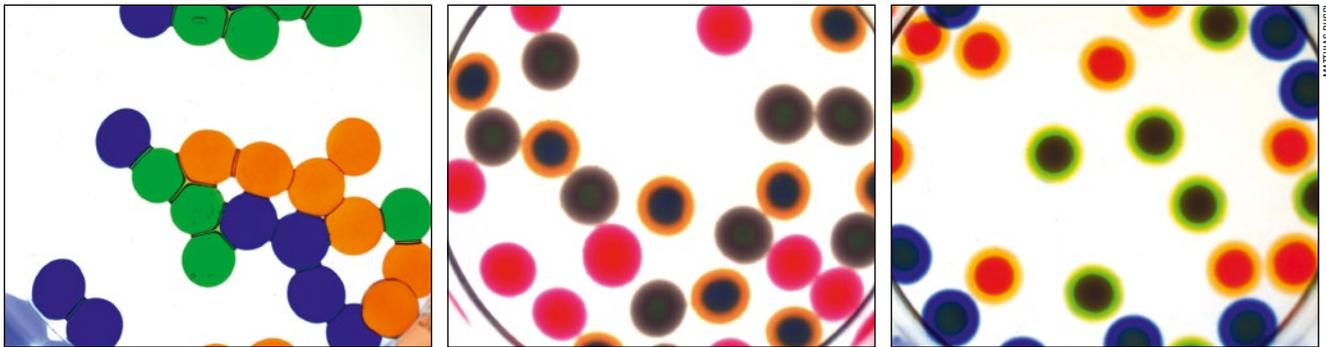
Besonders bunt geht es zu, wenn Sie Farbstoffe aus so genannten Zaubermalern in die Alginatbällchen einschleusen. Der Name dieser Filzstifte rührt daher, dass damit gezeichnete Linien beim Überstreichen mit einem »Magic Pen« wie durch Zauberhand ihre Farbe ändern. Was dabei chemisch geschieht, haben wir in einem früheren Beitrag bereits ausführlich erläutert (**Spektrum** November 2016, S. 70).

Für das Experiment nehmen wir drei Zaubermarker (zum Beispiel »Magic Colors« von Carioca), deren Strichfarbe sich von Blau nach Gelb, Hellgrün nach Braun und Gelb nach Rot ändert. Öffnen Sie die Stifte mit einer Zange am



Enthalten Alginatbällchen den Fluoreszenzfarbstoff Pyranin, leuchten sie unter UV-Licht in neutraler Lösung grün (links). Im Sauren fluoreszieren sie dagegen blau (rechts), weil das Farbstoffmolekül ein Proton angelagert hat (Mitte).





Alginatbällchen, die wegen eingeschleuster Farbstoffe aus Zaubermalern orange, grün oder blau erscheinen (links), beginnen sich nach dem Überschichten mit einer alkalischen Lösung von außen nach innen umzufärben (Mitte) – ein Vorgang, der nach etwa drei Minuten abgeschlossen ist. Durch anschließendes Ansäuern der Lösung lässt sich die Verfärbung rückgängig machen (rechts).

hinteren Ende und entnehmen Sie die Minen. Aus jeder drücken Sie drei Tropfen Farbstofflösung und vermischen sie jeweils in einem 20-Milliliter-Messbecher mit fünf Milliliter Natriumalginat-Lösung. Fügen Sie fünf Milliliter destilliertes Wasser hinzu und verrühren Sie die Lösungen mit einem Glasstab. Geben Sie anschließend je fünf bis zehn Tropfen davon in ein und dieselbe Calciumlactat-Lösung. Dort entsteht dadurch ein Sortiment aus gelb-orangen, blauen und grünen Alginatbällchen (links im Bild oben).

Werden diese nun, wie oben beschrieben, in ein Zehn-Milliliter-Rollrandgläschen überführt und mit zwei Milliliter Salmiakgeist (einer neunprozentigen Ammoniaklösung aus dem Baumarkt) überschichtet, verfärben sie sich an ihren Rändern. Das lässt sich sehr gut auf einem Tageslichtprojektor oder einer Leuchtplatte beobachten (Bild oben, Mitte). Der Farbwechsel schreitet ins Innere der Bällchen voran, bis sie durchgängig die Farbe auf der Kappe des jeweiligen Zaubermalers angenommen haben.

Der gesamte Vorgang lässt sich auch rückgängig machen. Um wieder die ursprünglichen Farben zu erhalten, müssen Sie nur am Ende zwei Milliliter 24-prozentige Salzsäure (ebenfalls im Baumarkt erhältlich) in das Rollgläschen gießen (rechts im Bild oben).

Verwandlungstrick in Violett

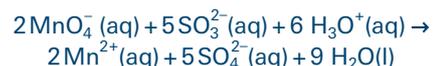
Bei den bisherigen Experimenten beruhte die Änderung der Farbe auf pH-Indikatoren in den Alginatbällchen und somit auf Säure-Base-Reaktionen. Ein anderer Typ von chemischen Umsetzungen sind Redoxreaktionen, bei denen Elektronen zwischen den Reaktionspartnern übertragen werden. Auch sie lassen sich in Alginatkügelchen durchführen. Allerdings braucht man für das folgende Experiment außer Salzsäure auch Kaliumpermanganat (KMnO_4) und Natriumsulfit-Heptahydrat ($\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) – zwei Chemikalien, die für Privatpersonen nicht leicht zu beschaffen, aber in Schullabors vorhanden sind.

Kaliumpermanganat ist ein Salz, das dunkle, violett glänzende Kristalle bildet. Es wirkt stark oxidierend und dient daher unter anderem als Desinfektionsmittel. Auch die menschliche Haut greift es an: Tunkt man einen Finger

in eine Kaliumpermanganat-Lösung, färbt er sich braun, da bei der Reaktion Braunstein (MnO_2) entsteht. Doch machen Sie dieses »Experiment« lieber nicht, und vermeiden Sie prinzipiell jeden direkten Kontakt mit dem ätzenden Stoff. Natriumsulfit ist ein weißes, kristallines Pulver, das reduzierend wirkt und deshalb mitunter in Fleckentfernern und Tintenkillern vorkommt.

Für das Experiment lösen Sie 0,01 Gramm Kaliumpermanganat in fünf Milliliter Wasser, geben ebenso viel Natriumalginat-Lösung hinzu und tropfen das Gemisch in die Calciumlactat-Lösung. Überführen Sie die entstehenden, intensiv violett gefärbten Kügelchen in zwei Milliliter einer 1:1-Mischung aus 24-prozentiger Salzsäure und Wasser, in der Sie 0,1 Gramm Natriumsulfit-Heptahydrat gelöst haben. Auf den ersten Blick scheinen die Alginatbällchen zu schrumpfen und schließlich ganz zu verschwinden. Bei genauerer Betrachtung erkennt man jedoch, dass sie sich von außen nach innen zunehmend entfärben.

Ursache hierfür ist die folgende Redoxreaktion zwischen eindiffundierenden Sulfit-Ionen (SO_3^{2-}) und den violetten Permanganat-Ionen (MnO_4^-):



Permanganat-Ionen + Sulfit-Ionen + Oxonium-Ionen → Mangan(II)-Ionen + Sulfat-Ionen + Wassermoleküle

Dabei entstehen ausschließlich farblose Reaktionsprodukte. ◀

QUELLEN

Brandl, H.: Trickkiste Chemie. Aulis, Köln 2010

Brezesinski, K., Ducci, M.: Donator-Akzeptor-Reaktionen in Alginatbällchen. In: Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule 65/7, S. 11–17, 2016

Ducci, M.: Jetzt geht's rund – Redoxreaktionen in Alginatbällchen. In: CHEMKON 23/1, S. 14–18, 2016

Ducci, M.: Die molekulare Redoxküche. In: Chemie & Schule 31/1, S. 5–10, 2016



MONTAGSMEETING

**WIRTSCHAFT JEDEN MONAT
ANDERS – MIT CAPITAL.**

Überraschende Perspektiven, hochwertige Optik und große Reportagen.

Capital

WIRTSCHAFT IST GESELLSCHAFT

Jetzt 3 Hefte für 15,60€ unter Tel.: 030-20 179 190 sichern.
Bitte Bestell-Nr.: 1613968 angeben. Oder auf www.capital.de/kennenlernen



Auch als digitale Ausgabe erhältlich.

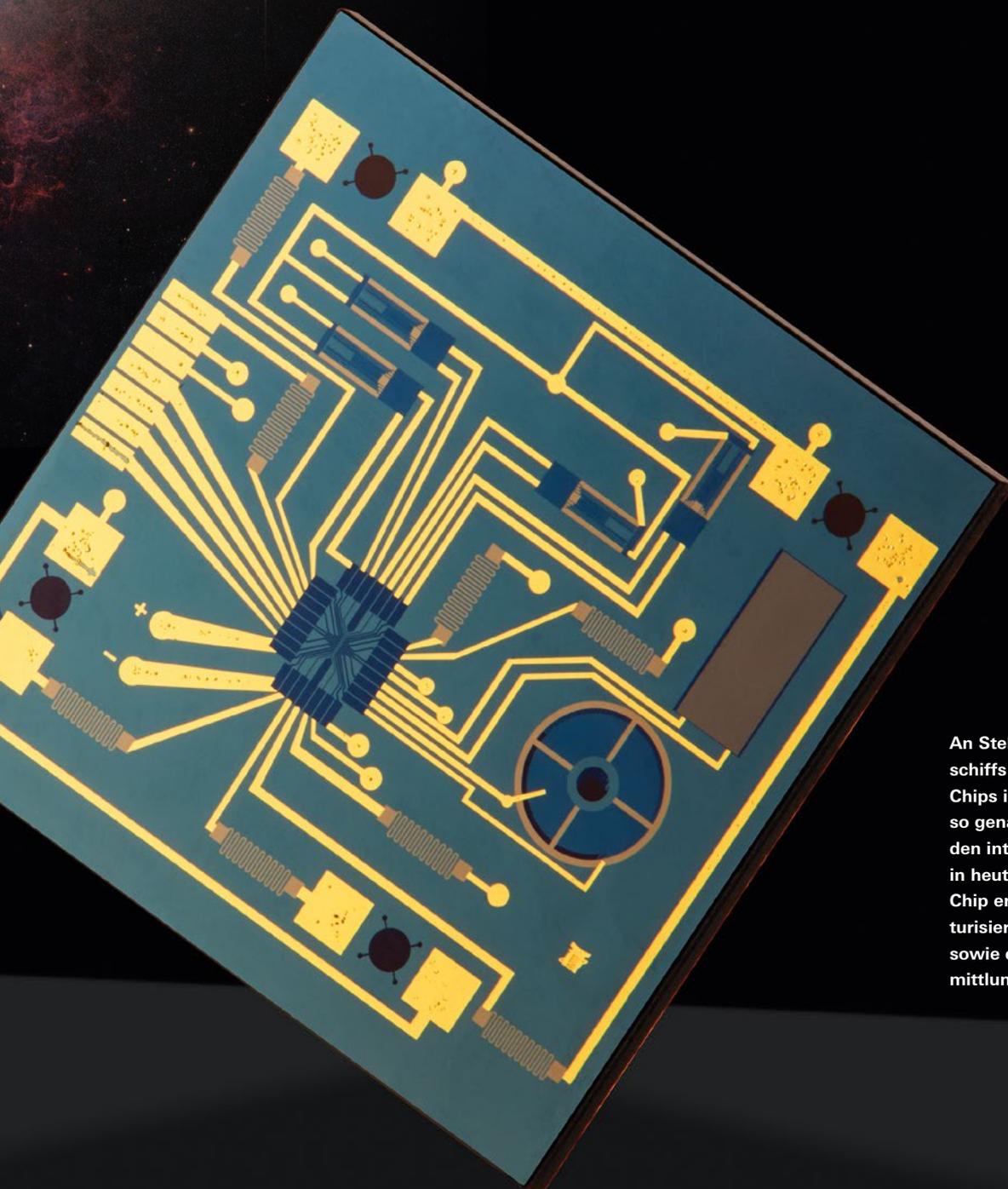
RAUMFAHRT AUFBRUCH NACH ALPHA CENTAURI

Ein schwerreicher Privatmann hat einen wahnwitzig wirkenden Plan: Er will eine Flottille von winzigen Raumsonden zum nächstgelegenen Sternsystem schicken – bei einer Reisedauer von nur rund 20 Jahren. Möglicherweise würden wir damit Informationen aus erster Hand über einen bewohnbaren Exoplaneten erhalten.



Ann Finkbeiner arbeitet als Wissenschaftspublizistin in Baltimore (US-Bundesstaat Maryland). Ihre Spezialgebiete sind Astronomie und Kosmologie sowie militärische Forschung.

► spektrum.de/artikel/1461031



An Stelle eines großen Raumschiffs soll ein Schwarm kleiner Chips ins All aufbrechen. Die so genannten StarChips ähneln den integrierten Schaltkreisen in heutigen Smartphones. Jeder Chip enthält Batterien, miniaturisierte Kameras und Sensoren sowie einen Sender zur Übermittlung der gewonnenen Daten.

Im Frühling 2016 traf ich bei einem Empfang den brillanten Physiker und Mathematiker Freeman Dyson – trotz seiner damals 92 Jahre ein äußerst lebhafter emeritierter Professor am Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey). Da Dyson stets für eine Überraschung gut ist, fragte ich ihn: »Was gibt's Neues?« Er antwortete mit schelmischem Lächeln: »Anscheinend fliegen wir nach Alpha Centauri.« Dieser Stern ist einer der nächsten Nachbarn unserer Sonne, und kurz zuvor hatte ein im Silicon Valley reich gewordener Unternehmer verkündet, dass er ein Raumvehikel dorthin schicken möchte. »Ist das eine gute Idee?«, fragte ich Dyson. Er grinste breit: »Nein, es ist albern.« Doch dann fügte er hinzu: »Aber das Raumschiff ist interessant.«

Tatsächlich: Das Projekt Starshot ist originell. Statt der üblichen Rakete, die von chemischen Reaktionen angetrieben wird und groß genug ist, um Menschen oder schwere Instrumente zu transportieren, besteht es aus einer Wolke winziger Chips, die an so genannten Lichtsegeln hängen. Jedes Segel soll so wenig Masse haben, dass ein gezielter Laserstrahl solche »StarChips« auf 20 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigen kann. Während die schnellste Rakete 30 000 Jahre brauchen würde, um den 4,37 Lichtjahre entfernten Nachbarstern zu erreichen, könnte Starshot das in 20 Jahren schaffen. Am Ziel würden die Chips nicht anhalten, sondern minuten-schnell an dem Sternsystem vorbeiflitzen und dabei Aufnahmen machen, die nach 4,37 weiteren Jahren schließlich die Erde erreichen würden.

Die »alberne« Seite der Starshot-Mission ist, dass sie eigentlich kein Forschungsziel verfolgt. Was Astronomen normalerweise über Sternsysteme wissen wollen, lässt sich nicht bei einem rasend schnellen Vorbeiflug erfahren, und so verspricht Starshot bestenfalls Schnapsschüsse ferner Welten. »Wir haben nicht allzu viel über Forschung nachgedacht«, räumt der dem Starshot-Beirat angehörende Astrophysiker Edwin (Ed) Turner von der Princeton University im US-Bundesstaat New Jersey ein. »Wir glau-

ben einfach, dass etwas Interessantes herauskommen wird.« Doch im August 2016 kam dem Starshot-Team der Zufall zu Hilfe: Europäische Forscher entdeckten einen Planeten, der Proxima Centauri umkreist, den ein zehntel Lichtjahr näher bei uns liegenden Nachbarstern von Alpha Centauri. Damit eröffnete Starshot plötzlich die Chance, einen Planeten jenseits des Sonnensystems aufzusuchen.

Obwohl die Idee mit dem stolzen Namen »Breakthrough Starshot« wie der Fiebertraum eines Sciencefiction-Fans anmutet, hat sie doch Hand und Fuß. Vieles ist Zukunftsmusik, aber alles beruht auf vorhandener Technik und verletzt kein physikalisches Gesetz – und das Projekt verfügt über Geld. Der Unternehmer Juri Milner, der mehrere Breakthrough-Initiativen und einen jährlichen Breakthrough-Preis finanziert, spendiert 100 Millionen Dollar für die Vorbereitung der Starshot-Mission. Milner hat einen imposanten Beirat gewonnen, dem weltweit renommierte Experten für Laser, Segel, Chips, Exoplaneten, Luftfahrt und Projektmanagement angehören sowie zwei Nobelpreisträger, der Hofastronom des englischen Königshauses, berühmte Astrophysiker, kompetente Ingenieure – und nicht zuletzt Dyson, der Starshot zwar für albern hält, aber das lasergetriebene Segel für eine vernünftige und aussichtsreiche Idee. Insgesamt hat ein Vorhaben, das über so viel Geld und Expertenwissen verfügt, einige Aussicht auf Erfolg.

Jedenfalls unterscheidet sich das Projekt hinsichtlich Ziel, Finanzierung und Management grundlegend von jeder bisherigen Raumfahrtmission. »Alles an Starshot ist ungewöhnlich«, betont Joan Johnson-Freese, eine Raumfahrtexpertin am Naval War College der USA in Newport (Rhode Island). Kommerzielle Weltraumfirmen sind gewinnorientiert und konzentrieren sich auf bemannte Missionen innerhalb des Sonnensystems. Auch die US-Weltraumbehörde NASA plant keine interstellaren Reisen: Sie scheut das Risiko, wird von ihrer umständlichen Bürokratie gehemmt und ist auf die Zustimmung des Kongresses angewiesen. »Die NASA braucht Zeit; Milliarden packen es einfach an«, meint Leroy Chiao, ein früherer Astronaut und Kommandeur der Internationalen Raumstation. »Man stellt ein Team zusammen, und los geht's.«

Juri – der Neuland betritt

Den Mann hinter dem Starshot-Projekt lockt seit jeher das Unbekannte. Juri Milner wurde 1961 in Moskau geboren; im selben Jahr flog Juri Gagarin als erster Mensch in den Weltraum. »Meine Eltern nannten mich nicht ohne Grund Juri«, erklärt Milner: Sie wollten, dass er Neuland betrat. Zunächst studierte er Physik – »meine erste Liebe« – und widmete sich der Quantenchromodynamik. »Leider war ich nicht sehr erfolgreich.« Anschließend wurde er Unternehmer; er investierte in Facebook und Twitter und erwarb ein Vermögen, das auf fast drei Milliarden Dollar geschätzt wird. »Vor ein paar Jahren«, sagt Milner, »fiel mir meine erste Liebe wieder ein.«

2013 stiftete er je einen Breakthrough-Preis für Biowissenschaften, Mathematik und Physik. Zwei Jahre darauf begann er mit seinem »Hobby«, den Breakthrough-Initiativen: eine Million Dollar für die beste Botschaft an eine

AUF EINEN BLICK UTOPISCH, ABER FASZINIEREND

- 1** Ein Silicon-Valley-Milliardär tritt als Mäzen für das bisher kühnste Vorhaben zur Erkundung des Kosmos auf: Unbemannte Raumfahrzeuge sollen einen Nachbarstern der Sonne aufsuchen.
- 2** Die Mission »Breakthrough Starshot« würde Lichtsegel, an denen kleine Chips hängen, mit Laserstrahlung antreiben. Die Chips könnten Fotos machen und zurück zur Erde senden.
- 3** Der Plan mutet utopisch an, beruht aber auf bekannten technischen Prinzipien. Auch wenn die Mini-Raumschiffe vielleicht niemals Alpha Centauri erreichen, könnten sie zumindest unser Sonnensystem erkunden.

außerirdische Zivilisation, 100 Millionen für eine umfassende Suche nach außerirdischer Intelligenz – und 100 Millionen Dollar für Starshot.

Anfang 2015 stellte Milner aus Leuten, die er bei verschiedenen Breakthrough-Treffen kennen gelernt hatte, das Management für Starshot zusammen. Beiratsvorsitzender wurde Avi Loeb, Leiter der Astronomie-Abteilung an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts); Geschäftsführer ist Pete Worden, der zuvor das Ames Research Center der NASA in Moffett Field (Kalifornien) leitete und an einem Plan von NASA und Verteidigungsministerium für eine Reise zu den Sternen irgendwann in den nächsten 100 Jahren beteiligt war. Als technischen Direktor gewann Worden den Raumfahrtingenieur Pete Klupar, der für ihn beim Ames Research Center gearbeitet hatte. Der eindrucksvolle Beirat umfasst Technikspezialisten, die offenbar nicht des Geldes wegen mitmachen, sowie Prominente wie Facebook-Chef Mark Zuckerberg und den Kosmologen Stephen Hawking. Der Managementstil kombiniert die hierarchische Entscheidungstrenge der NASA mit der lockeren Silicon-Valley-Kultur, die ein paar schlaue Leute zusammenbringt, ihnen ein langfristiges Ziel setzt und sie dann sich selbst überlässt. Beiratsmitglied James Benford, Präsident der Firma Microwave Sciences, meint, der Auftrag laute: »Ihr habt kommende Woche, und ihr habt fünf Jahre, und nun findet heraus, wie ihr beides verbindet.«

Das Team kam schnell überein, dass es utopisch wäre, Menschen nach Alpha Centauri zu schicken; man bevorzugte eine unbemannte Mission, die in schätzungsweise 20 Jahren starten könnte. Als größtes Problem galt der Raumschiffantrieb. Mitte 2015 sortierten Loeb's Studenten die Chancen in die Kategorien unmöglich, denkbar und machbar. Im Dezember schickte ihnen Philip Lubin, Physiker an der University of California in Santa Barbara, einen Artikel mit dem Titel »A Roadmap to Interstellar Flight«. Lubin schlug als Antrieb zahlreiche kleine Laser vor, die durch kohärente Kopplung einen einzigen starken Strahl erzeugen. Der Strahlungsdruck beschleunigt ein Segel und einen daran hängenden Chip auf einen nennenswerten Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit, mit dem das kleine Segelraumschiff im Lauf einiger Jahrzehnte einen anderen Stern erreicht. Eine ähnliche Idee hatte der Sciencefiction-Autor Robert Forward schon 30 Jahre früher publiziert. Obwohl die Technik weit hergeholt anmutete, übernahm das Starshot-Projekt Lubin's Fahrplan, und der kalifornische Physiker gehört nun zum Team.

Im Januar 2016 trafen sich Milner, Klupar, Worden, Loeb und Lubin in Milner's Haus im Silicon Valley, um eine Strategie zu entwerfen. »Juri kam mit einem Schriftstück voller Haftnotizen«, erzählt Lubin, »und stellte die richtigen Fragen nach Methodik und Kosten.« Allen gefiel das ungewöhnliche Projekt, weil man nicht wie bei der NASA langwierige Entscheidungen über diverse Vorschläge abwarten musste oder vom Profitinteresse einer Privatfirma abhing, sondern völlig frei den optimalen Plan aushecken durfte.

Wirklich teuer soll bei Starshot nur der Laser werden. Die Segel und Chips sind billige Massenprodukte, die zu Hunderten oder Tausenden in eine Transportrakete



Ein Labor in Mountain View (Kalifornien) entwickelt Prototypen der StarChips. Mit 15 Millimetern Seitenlänge sind sie so klein und leicht, dass der Strahlungsdruck eines Lasers auf ein an den Chips befestigtes Lichtsegel ausreichen könnte, um sie auf ein Fünftel der Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen.

STAN MUSILEK

gepackt, in den erdnahen Weltraum geschossen und dort einzeln freigesetzt werden, wobei es auf den Verlust einiger Chips nicht ankommt. Der Laser strahlt jedes Segelraumschiff an und beschleunigt es in Minutenschnelle auf 20 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Dann wird der Laser ausgeschaltet, und die StarChips jagen antriebslos weiter. Wenn sie den Stern erreichen, melden sich die Chips daheim. »Vor zehn Jahren hätten wir über so etwas nicht ernsthaft diskutieren können«, betont Milner. Doch da die Leistung von Lasern und Chips exponentiell steigt und Forscher fortwährend neue Materialien entwickeln, »wird es nicht Jahrhunderte dauern, sondern Jahrzehnte«.

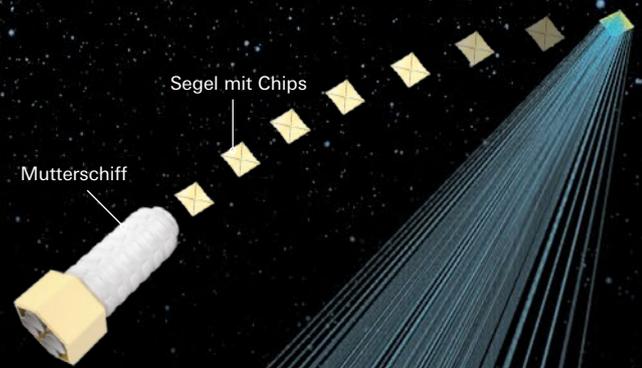
Das Starshot-Management bat Experten um kritische Stellungnahmen, doch niemand fand an dem Projekt grundsätzlich etwas auszusetzen. »Ich kann sofort sagen, warum es schwierig und kostspielig ist«, meint Lubin, »aber ich weiß nicht, warum es unmöglich sein soll.« Anfang April 2016 war sich das Team über das System einig, und schon am 12. April präsentierte Milner auf einer Pressekonferenz in der Spitze des neuen One World Trade Center in New York ein »interstellares Segelboot«, bei dem Licht die Rolle des Winds übernimmt. Die Details stellen die Entwickler allerdings vor beträchtliche Herausforderungen. Der winzige StarChip darf höchstens ein paar Gramm

Reise zu den Sternen

Breakthrough Starshot verfolgt den ehrgeizigen Plan, winzige Raumfahrzeuge nach Alpha Centauri zu schicken und beim schnellen Vorbeiflug das Sternensystem und mögliche Planeten zu erkunden. Die Mission wäre der erste Versuch, eine interstellare Reise durchzuführen. Als Antrieb dient der Strahlendruck, den eine erdgestützte Laserbatterie auf extrem dünne Lichtsegel ausübt. An den Segeln hängen Chips, die Daten gewinnen und zur Erde zurücksenden.

A Eine herkömmliche Rakete bringt das Mutterschiff in eine Erdumlaufbahn. Von dort startet drei Jahre lang täglich ein StarChip und entfaltet sein Lichtsegel, der vom Strahl der Laserbatterie erfasst und beschleunigt wird.

B Hundert Millionen kleine Laser sind zu einem kilometergroßen Quadrat angeordnet. Sie bilden einen phasengesteuerten Gruppenlaser, der die Lichtsegel der StarChips binnen Minuten auf 20 Prozent der Lichtgeschwindigkeit bringt.

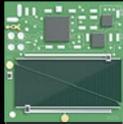


phasengesteuerter Gruppenlaser

C Die StarChips kommunizieren mit der Erde, indem sie Daten zum irdischen Gruppenlaser zurücksenden. Die Signale müssen äußerst präzise ausgerichtet sein, wenn sie über interstellare Distanzen ihr Ziel treffen sollen.

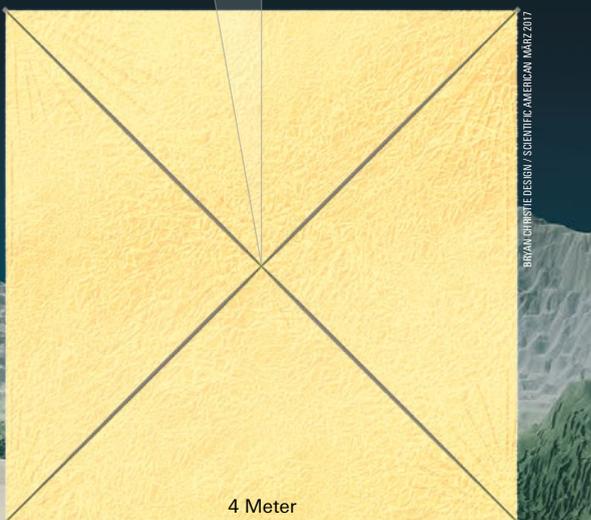
StarChip

Jedes der zentimetergroßen Raumfahrzeuge wiegt nur rund ein Gramm. Dennoch enthält der Chip Recheneinheiten, Kameras und Batterien sowie Spektrografen und Magnetometer.



Lichtsegel

Jeder StarChip ist mit einem wenige Quadratmeter großen Segel verbunden, das der Strahlungsdruck des erdgestützten Lasers vorantreibt. Das Segelmaterial muss ein Reflexionsvermögen von 99,999 Prozent aufweisen und extrem leicht sein, um die Chips auf einen nennenswerten Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen.



schwer sein, soll aber dennoch große Datenströme sammeln und versenden, seine eigene Energieversorgung mitführen und die lange Reise überstehen.

Vor einigen Jahren baute ein Team um den Ingenieur Mason Peck an der Cornell University in Ithaca (New York) so genannte Sprites: vier Gramm schwere Chips, die einen Lichtsensor, Solarmodule und ein Radio enthalten. Die Starshot-Chips sollen ihnen ähneln, jedoch noch weniger wiegen – rund ein Gramm – und jeweils vier Kameras tragen. An Stelle schwerer Linsen könnte ein winziges Beugungsgitter über dem Lichtsensor die einfallende Strahlung fokussieren. Ein in den Chip integrierter Spektrograf würde die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre fremder Planeten bestimmen; auch ein Gerät zum Messen stellarer Magnetfelder wäre dabei.

Von Sternenchips und Lichtsegeln

Die Chips müssen ihre Aufnahmen über interstellare Distanzen zurücksenden. Satelliten verwenden derzeit Ein-Watt-Diodenlaser, um Daten auf unvergleichlich kürzere Entfernung zu übermitteln. Peck zufolge fand die bisher weiteste Übertragung vom Mond aus statt, der mehr als 100 Millionen Mal näher bei der Erde liegt als Alpha Centauri. Um uns vom Nachbarstern zu erreichen, muss das Lasersignal außerordentlich genau zielen. Unterwegs wird es gut vier Jahre lang verbreitert und geschwächt, bis am Ende vielleicht ein paar hundert Photonen davon bei uns ankommen. Eine Möglichkeit wäre, die Bilder etappenweise zu übertragen – längs einer Serie von StarChips, die dem ersten in regelmäßigen Abständen folgen.

Die Chips bräuchten auch Batterien für die Kameras und Bordcomputer, die im Lauf der 20 Jahre langen Reise Daten zur Erde senden. Wegen der wenigen Watt, die ein kleiner Chip zu leisten vermag, würde das irdische Starshot-Empfangsgerät tatsächlich ein nur wenige Photonen starkes Signal auffangen. Bislang gibt es keine Energiequelle, die in fast absoluter Dunkelheit und Kälte funktioniert, weniger als ein Gramm wiegt und dennoch genügend Leistung bringt. »Die Energie ist das größte Problem auf dem Chip«, betont Peck. Er schlägt vor, winzige Nuklearbatterien einzusetzen, wie sie in medizinischen Implantaten verwendet werden. Man könnte auch die Energie nutzen, die das Segel sammelt, während es durch Gas und Staub des interstellaren Mediums zieht und sich dabei durch Reibung erwärmt.

Das interstellare Medium bedroht aber zugleich die Starshot-Chips. Bruce Draine, Astronom an der Princeton University und Beiratsmitglied, vergleicht es mit stark verdünntem Zigarettenrauch. Da niemand die Dichte des Mediums und die Größe der Staubkörner genau kennt, lässt sich der mögliche Schaden schwer abschätzen. Trifft ein Korn mit nahezu Lichtgeschwindigkeit auf einen StarChip, so reicht der mögliche Schaden von einem kleinen Krater bis zu völliger Vernichtung. Wie Draine schätzt, würde ein zentimetergroßer StarChip unterwegs »mit vielen, vielen dieser Dinger kollidieren«. Gegen kleine Partikel dürfte ein millimeterdicker Überzug aus Berylliumkupfer Schutz bieten, aber Staubkörner könnten dennoch katastrophalen Schaden anrichten. Das werden viele Chips nicht überste-

hen, meint Peck, aber von Hunderten oder Tausenden sollten es immerhin einige bis zum Ziel schaffen.

Kaum weniger anfällig ist das Segel. Der Rückstoß des von ihm reflektierten Laserlichts soll die StarChips vorantreiben. Je mehr Strahlung es reflektiert, desto stärker ist der Strahlungsdruck und desto schneller das Segel. Für 20 Prozent der Lichtgeschwindigkeit muss das Reflexionsvermögen 99,999 Prozent betragen. »Alles, was nicht reflektiert wird, heizt das Segel auf«, erklärt Geoffrey Landis, der am Glenn Research Center der NASA in Brook Park (Ohio) forscht und dem Starshot-Beirat angehört. Wegen der extremen Intensität des Laserstrahls »würde selbst ein kleiner Bruchteil seiner Energie durch Erwärmung verheerend wirken«. Im Vergleich zu heutigen Sonnensegeln, die schon einige experimentelle Sonden durch unser Planetensystem befördert haben, muss das Starshot-Segel viel leichter sein, ungefähr »so dick wie eine Seifenblase«, meint Landis. Im Jahr 2000 gelang es James Benford, eine Schicht aus Kohlenstofffasern mit einem Mikrowellenstrahl auf das 13-Fache der Erdbeschleunigung hochzujagen. Das Starshot-Segel müsste allerdings bis zum 60 000-Fachen aushalten. Außerdem droht der Staub des interstellaren Mediums die dünne Schicht zu durchlöchern. Bisher gibt es kein Material, das zugleich leicht, robust, reflektierend und hitzefest ist und nicht viele Millionen Dollar kostet.



ISTOCK / SDECORET

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Auch weitere Fragen sind noch offen. Der Chip könnte über Kabel mit dem Segel verbunden sein oder direkt darauf kleben. Vielleicht muss das Segel rotieren, damit es in der Mitte des Laserstrahls bleibt. Nach der anfänglichen Beschleunigungsphase soll es sich wie ein Regenschirm zusammenfallen, um während der langen Reise weniger verwundbar zu sein. Bei Annäherung an Alpha Centauri würde es sich wieder entfalten und die Form eines Teleskopspiegels oder einer Antenne annehmen, um die Botenchaften des Chips zurück zur Erde zu senden.

Eine gigantische Strahlenkanone mit 100 Gigawatt Leistung

Alle diese Probleme verblassen jedoch vor denen, die der erdgestützte Antriebslaser bereitet. Damit Starshot einen nennenswerten Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit erreicht, muss der Laser 100 Gigawatt (Milliarden Watt) leisten. Das US-Verteidigungsministerium hat zwar noch stärkere Laser produziert, berichtet Robert Peterkin, Chefwissenschaftler am Directed Energy Directorate des Air Force Research Laboratory bei Dayton (Ohio), aber sie

blitzen bloß eine milliardstel oder billionstel Sekunde lang. Der Starshot-Laser müsste jedes Segel minutenlang bestrahlen. Zu diesem Zweck lassen sich kleine Faserlaser flächig anordnen und so in Phase bringen, dass ihr gesamtes Licht einen kohärenten Strahl bildet. Militärforscher haben solche phasengesteuerten Gruppenlaser gebaut, wobei laut Peterkin 21 Laser ein 30 Zentimeter großes Feld bilden, das ein paar dutzend Kilowatt leistet. Der Starshot-Laser muss hingegen 100 Millionen solcher Kilowatt-Laser auf einem Quadrat mit einem Kilometer Seitenlänge vereinen.

»Das ist schon utopisch«, sagt Peterkin. »Und es kommt noch schlimmer.« Das Licht jedes einzelnen der 100 Millionen Laser wird von der natürlichen Turbulenz der Atmosphäre abgelenkt, soll aber am Ende zusammen mit allen anderen ein vier Quadratmeter großes Segel in 60 000 Kilometern Entfernung treffen. Beiratsmitglied Robert Fugate, vormals Forscher am Directed Energy Directorate, fragt sich, wie das gelingen kann. Das Licht könnte das Segel komplett verfehlen oder es so streifen, dass das Segel taumelt, rotiert oder dem Strahl entgleitet.

Das Starshot-Team hat dafür eine Lösung, die aber wiederum eigene Probleme schafft. Große Teleskope arbeiten bereits mit adaptiver Optik, welche die Luftunruhe durch eine computergesteuerte Verformung des Spiegels ausgleicht. Doch bei Starshot muss jeder Faserlaser einzeln exakt adaptiert werden. Derzeit vermag die adaptive Teleskopoptik bestenfalls einen 30 Millibogensekunden großen Punkt am Himmel aufzulösen. Starshot soll den Strahl auf ein Hundertstel dieses Werts fokussieren – gegenwärtig ist das pure Zukunftsmusik.

Selbst wenn sich diese vielfältigen Probleme lösen lassen, muss daraus am Ende auch noch ein funktionierendes Gesamtsystem entstehen. Dafür gebe es momentan nicht einmal einen Entwurf, betont Systemingenieur und Beiratsmitglied Kevin Parkin von der Firma Parkin Research. Für die kommenden Jahre ist laut Pete Klupar zunächst geplant, überschaubare Experimente durchzuführen und mathematische Modelle zu entwerfen, mit einem relativ bescheidenen Finanzrahmen von jeweils einigen hunderttausend bis zu 1,5 Millionen Dollar. Danach sollen Prototypen entstehen und – angenommen, sie funktionieren erfolgreich – ab 2030 Laser und Segel, so dass um das Jahr 2045 der Start in Frage käme. Bis zu jenem Zeitpunkt wird Starshot wahrscheinlich Milliarden Dollar verschlingen und, wenn alles gut geht, weltweit Unterstützung von Regierungen, Labors und Weltraumagenturen gewinnen. »Ich werde darum werben und hoffe, dass sich noch mehr Leute anschließen«, sagt Milner. »Es muss global sein«, fügt er hinzu und weist auf Fragen der nationalen Sicherheit hin, die eine derart gewaltige Strahlenkanone aufwirft. »Wenn man so etwas im Geheimen anfängt, weckt das Misstrauen. Man muss offen agieren.«

Gibt es überhaupt eine Aussicht auf Erfolg? Technisch versierte Experten, die nicht für Starshot arbeiten, geben dem Projekt geringe Chancen oder behaupten schlicht: Daraus wird nichts. David Charbonneau vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge (Mas-



Auf einer Pressekonferenz am 12. April 2016 gab der Unternehmer Juri Milner (links) das von ihm finanzierte Projekt Breakthrough Starshot bekannt. Dem Beirat gehören prominente Forscher wie Stephen Hawking (Mitte) und Freeman Dyson (rechts) an.

sachusetts) meint, das Ganze würde letztlich so teuer, dass »die amerikanische Bevölkerung dafür fünf Prozent des Staatshaushalts opfern müsste – so viel wie für das Apollo-Mondprogramm.«

Auf zu fernen Planeten!

Die Starshot-Befürworter halten die Chancen für größer, bleiben aber realistisch. »Gewiss können wir Geräte mit Lasern nach Alpha Centauri schicken«, meint Beiratsmitglied Greg Matloff vom New York City College of Technology. »Ich weiß nur nicht, ob wir das innerhalb der nächsten 20 Jahre schaffen.« Zac Manchester von der Harvard University sagt: »In 50 Jahren stehen die Chancen ziemlich gut; in einem Jahrhundert liegen sie bei 100 Prozent.« Pete Worden findet den Projektansatz maßvoll: »Vielleicht stellen wir in fünf Jahren fest, dass es nicht geht.« Juri Milner will Starshot nicht nur finanzieren, sondern auch Ergebnisse sehen: »Wenn es mehr als eine Generation dauert, sollten wir es sein lassen.«

Bis Ende August 2016 dachte ich: Dyson hat Recht – Starshot ist technisch faszinierend, aber das Ziel albern. Bei Alpha Centauri handelt es sich um ein Binärsystem, und beide Sterne (Alpha Centauri A und B) sind keine Exoten, sondern ähneln der Sonne. Die Astronomen kennen solche Sterne recht gut, meint Charbonneau, und »was wir durch eine Fahrt dorthin über Sternphysik lernen würden, ist den Aufwand nicht wert.«

Doch wie wir jetzt wissen, besitzt Alpha Centauris Nachbarstern einen Planeten. Proxima Centauri ist ein Roter Zwerg, der häufigste Sterntyp. Der Planet Proxima b umkreist ihn in einem Abstand, der Leben erlaubt. Könnte das Starshot-Team das Projektziel ändern? »Na klar«, sagt

Milner, »wir haben viel Zeit, uns zu entscheiden.« Der Bodenlaser müsste sein Ziel bloß um zwei Grad verschieben, erklärt Fugate. Klupar zufolge möchte die Breakthrough-Initiative letztlich alle Planeten von benachbarten Sternen aufspüren, und Proxima Centauri b könnte den Anfang machen.

Natürlich stellt sich die Frage, ob man dafür Starshot braucht. Die Chips sollen Bilder schießen, vielleicht das planetare Magnetfeld messen und die Atmosphäre analysieren – all das binnen weniger Minuten. Angesichts der Vorbereitungszeit und der Gesamtkosten des Starts wendet der Astrophysiker David Spergel von der University of Princeton ein: »Wir können ein 12 bis 15 Meter großes optisches Weltraumteleskop bauen, den Planeten monatelang beobachten und viel mehr Daten gewinnen als bei einem blitzschnellen Vorbeiflug.« Andererseits findet Spergel die Starshot-Technik an sich interessant; mit ihrer Hilfe ließen sich einige wichtige Ziele inner- und außerhalb unseres Sonnensystems erreichen.

Milner hofft, dass sein Projekt das Einheitsgefühl der Menschheit stärkt. »In den vergangenen sechs Jahren habe ich die Hälfte meiner Zeit auf Reisen verbracht, vor allem in Asien und Europa«, erzählt er. »Ich erkannte, dass ein globaler Konsens zwar schwierig ist, aber nicht unmöglich.« Das Anliegen passt zu den anderen Breakthrough-Initiativen, die vor allem Kontakt mit Außerirdischen suchen, sowie zu Milners beträchtlichen Investitionen in das Internet und die sozialen Medien, die Meinungsaustausch und Gemeinschaft erleichtern.

James Gunn, emeritierter Professor für Astrophysik in Princeton, hält zwar die Erfolgsaussichten von Starshot für gering und den wissenschaftlichen Ertrag für vernachlässigbar, gibt aber zu: »Schon als Kind habe ich davon geträumt, zu den Sternen zu fliegen.« Ähnlich äußern sich viele im Beirat.

Freeman Dyson drückt die in solchen Träumen verborgenen Widersprüche vielleicht am besten aus. Der StarChip mit seinem lasergetriebenen Segel sei sinnvoll, meint er, und hinter dem Projekt stünden kluge und vernünftige Leute. Doch sie sollten den Versuch aufgeben, Alpha oder Proxima Centauri zu erreichen, sondern sich lieber auf das Sonnensystem konzentrieren; dafür würden weniger starke Laser und geringere Geschwindigkeiten ausreichen. »Das Forschen liegt uns Menschen«, sagt er. »Darin sind wir sehr gut.« Nach seiner Meinung sollten Automaten das Universum erforschen; für bemannte Raumfahrt gebe es keine wissenschaftliche Berechtigung. Aber da Dyson immer für eine Überraschung gut ist, fügt er hinzu: »Andererseits würde ich trotzdem liebend gern losfliegen.« ◀

QUELLEN

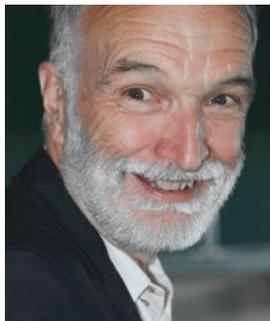
Alpert, M.: Alpha Centauri or Bust. In: Guest Blog, www.scientificamerican.com, 13. April 2016

Online unter <https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/alpha-centauri-or-bust>

Lubin, P.: A Roadmap to Interstellar Flight. In: Journal of the British Interplanetary Society 69, S. 40–72, 2016

Popkin, G.: First Trip to the Stars. In: Nature 542, S. 20–22, 2017

SCHLICHTING! WENN SCHNÜRSENKEL VERSAGEN



Egal, wie fest man die Schleife bindet, irgendwann öffnet sich beim Laufen jeder Knoten. Das geschieht meist innerhalb weniger Schritte, wenn sich unscheinbar kleine Effekte plötzlich katastrophal aufschaukeln.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 wurde er mit dem Archimedes-Preis für Physik ausgezeichnet.

► spektrum.de/artikel/1461049

► Kinder können viele Schuhe bequem mit Klettverschlüssen selbst fixieren, doch niemand kommt umhin, irgendwann einmal das Binden einer Schleife zu lernen. Dazu windet man die straff gezogenen Schnürsenkel zunächst einmal umeinander. Bei diesem ersten Halbknoten reicht die Reibungskraft zwischen den Bändern aber noch nicht aus. Darum knüpft man einen zweiten Halbknoten gegen den ersten und presst beide Bänder durch Ziehen zusammen. Damit das Konstrukt einfach wieder gelöst werden kann, formt man die Enden zuvor zu einer Schlaufe. In der Knotenkunde heißt es, man legt den Knoten »auf Slip«.

Den meisten ist beim Schuhebinden wohl kaum bewusst, dass es für die Verknüpfung topologisch gesehen zwei Möglichkeiten gibt. Zum einen kann man links über rechts und danach rechts über links führen. Das ergibt einen so genannten Kreuzknoten (siehe Fotos rechte Seite). Möglich ist zum anderen, zweimal links über rechts zu legen; dann erhält man eine äußerlich ganz ähnliche Variante, die als falscher oder Altweiberknoten bezeichnet wird und weniger dauerhaft ist.

Die Windung hat physikalische Konsequenzen, denn sie drückt die Bänder unter Zug aneinander. Dadurch steigt die Reibungskraft – umso mehr, je größer der Winkel der Bänder relativ zueinander wird. Das kennt man beispielsweise vom Festmachen eines Schiffs an einem Poller. Erstaunt erlebt man hier, wie ein einzelner Mensch ein schweres Boot halten kann, nur weil das Seil um den Pfosten geschlungen ist. Die Reibungskraft nimmt sogar exponentiell mit dem Winkel zu, und dieser wächst mit jeder Umwindung um 360 Grad.

Das Sein ist eine aus lauter Knoten bestehende Linie

Friedrich Hebbel (1813–1863)

Ein Knoten zeichnet sich topologisch also durch ausgeprägte Winkeländerungen der miteinander verknüpften Bänder aus. Eine entsprechend große Reibung ist im Spiel. Zieht man beim Schuh an den Schlaufen, werden die Schnürsenkel immer stärker aneinandergedrückt, bis es zu einer Selbsthemmung kommt, die jegliche weitere Bewegung unmöglich macht. Der Knoten ist fertig.

Doch was hält ihn zusammen, sobald von außen keine Zugkräfte mehr wirken? Letztlich ist es die an sich geringe elastische Rückstellkraft der zusammengepressten Bänder. Bei einer Ausdehnung würden sie ebenfalls einen Zug ausüben – zwar klein, aber durch die extreme Verschlingung potenziert. Daher hängt die Festigkeit des Knotens stark von der Beschaffenheit der Kordel ab. Ist sie sehr glatt und nur wenig eindrückbar, lässt sich mit ihr kaum ein fester Knoten knüpfen, der wesentlich mehr halten soll als sich selbst.

Wer einmal versucht hat, einen blockierten Knoten zu entwirren, weiß: Kein wie auch immer gearteter Zug führt zum Ziel. Man muss das Durcheinander aufdröseln, indem man die Bänder lockert. Ob man nun einen spitzen Gegenstand dazwischen einführt oder den Knoten kräftig durchwinkt, es ist meist eine langwierige Angelegenheit. Eine radikale Lösung wie beim Gordischen Knoten ist für ungeduldige Schuhträger jedenfalls nicht empfehlenswert.

Daher sorgt man hier von vornherein durch eine ebenso einfache wie raffinierte Schlaufenbildung dafür, dass man den zweiten Halbknoten durch bloßen Zug an einem der freien Enden öffnen kann. Der Rest erledigt sich von selbst. Allerdings hält dieser Schleife genannte



Beim Kreuzknoten (oben) liegen die auslaufenden Enden symmetrisch auf den einlaufenden. Beim weniger haltbaren Altweiberknoten (unten) sind sie versetzt.



Am Schuh unterscheiden sich Kreuzknoten und Altweiberknoten sichtbar dadurch, dass die Schleife bei ersterem quer, bei letzterem längs zum Schuh orientiert ist.

Knoten meist nicht lange. So fest die Schnürsenkel sein mögen, sie lösen sich wie von unsichtbarer Hand schließlich doch. Dazu bedarf es nicht mehr und nicht weniger, als mit den Schuhen bestimmungsgemäß umzugehen, also zu laufen.

Wie kommt es zu der geheimnisvollen Öffnung? Dieser Frage sind Ingenieure von der University of California in Berkeley in einer Veröffentlichung vom April 2017 nachgegangen. Um dem Mechanismus auf die Spur zu kommen, haben die Forscher um Oliver O'Reilly die mechanischen Einwirkungen auf die Schleife beim Auftreten auf den Boden und beim Schwingen der Beine untersucht.

Dabei reichte keiner der beiden Vorgänge allein aus. Erst deren Zusammenspiel führt zunächst zu einer meist langsamen, allmählichen Lockerung und kulminiert dann plötzlich innerhalb weniger Schritte. Fast jeder kennt das: Kaum ist die erste Veränderung am Schuhwerk spürbar, löst sich schon der Knoten.

Aus Sicht des Läufers pendeln die Beine wechselseitig nach vorn, um beim Auftreten ruckartig gebremst zu werden. Bezogen auf das Zentrum des Knotens bewegen sich daraufhin sowohl die Schlaufen als auch die etwa gleich langen freien Enden aus Trägheit in Fortbewegungsrichtung weiter. Dabei ziehen sie ein wenig am Knoten.

Gleichzeitig überträgt sich beim Auftreten die Reaktionskraft vom Boden auf den Schuh und damit teilweise auf den Knoten, was diesen erschüttert und leicht durchwalkt. Die Reibungskraft, die ihn zusammenhält, beruht letztlich auf der starken Verformung der Schnürbänder. Das Rütteln lockert das Gebilde geringfügig und vermindert so die Reibung. Wenn gleichzeitig die durch Trägheit vorschleunigten Schnürsenkel ein wenig zup-

fen, findet – wenngleich mit minimalem Effekt – genau das statt, was beim regulären Öffnen einer Schleife stattfindet: ein Zug an den freien Bandenden. Die Trägheit betrifft freilich ebenso die beiden Schlaufen. Sie könnten mit einer ihrer Hälften zwar dem Zerren am entgegengesetzten freien Ende entgegenwirken, allerdings sind sie durch ihre geschlossene Form recht starr, was diesen Einfluss reduziert.

So gering die Wahrscheinlichkeit einer noch so kleinen Verlängerung der freien Enden anfangs sein mag, irgendwann geschieht es. Daraufhin nimmt bei den folgenden Schritten ihr Trägheitseinfluss zu, während sich derjenige der nunmehr verkürzten Schlaufen verringert. Tritt für Tritt verstärkt sich der Prozess also selbst. Die Nichtlinearität des Ganzen erklärt die Erfahrung, warum lange Zeit nichts zu passieren scheint und der Knoten dann auf einmal in wenigen Schritten regelrecht zerfällt. Dies gilt für den Altweiberknoten umso mehr, da die Bandenden bereits von Anfang an in Bewegungsrichtung zeigen. So kommt ihre Trägheit besonders effektiv zur Geltung.

Diese Beobachtung bestätigten die Wissenschaftler reproduzierbar mit einer automatisierten Schwing- und Schlagvorrichtung. Ihre Erklärung könnte sich als eine wichtige Grundlage dafür erweisen, Knotenöffnungen in mathematischen Modellen zu beschreiben. Damit lässt sich im Alltag das leidige Problem zwar nicht verhindern. Aber immerhin weiß man jetzt, warum das Schuhband schon wieder locker ist.

QUELLE

Daily-Diamond, C. A. et al.: The Roles of Impact and Inertia in the Failure of a Shoelace Knot. In: Proceedings of the Royal Society A 473, 20160770, 2017

KATHEDRALEN ZEICHEN DER MACHT

Höher, größer, schöner – diesem Motto folgten französische Dombaumeister bereits Mitte des 12. Jahrhunderts, Jahrzehnte früher als lange angenommen, und entwickelten für Kathedralen den gotischen Stil. Im deutschen Königreich hingegen beharrten Bischöfe zunächst auf der traditionellen Romanik.



Matthias Untermann lehrt Mittelalterliche Kunstgeschichte in Heidelberg. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen die Sakralarchitektur sowie die Archäologie des Hoch- und Spätmittelalters. Aktuell forscht er zum Zisterzienserkloster Maulbronn und zu den Domkirchen in Worms, Mainz und Magdeburg.

» spektrum.de/artikel/1459407

► Wo immer sie errichtet wurden, prägten Kathedralen weithin sichtbar das Stadtbild. Künstlerischer Aufwand und geplante Dimensionen stießen hier bewusst an die Grenzen des damals Möglichen. Werkstattgemeinschaften und Bauhütten entwickelten eigens neue Organisationsstrukturen und Bautechniken. Kathedralen setzten aber nicht nur Maßstäbe in der Architektur, sondern auch in der Liturgie, waren sie doch Schauplatz aufwändiger Gottesdienste, zu denen die Gläubigen zu Hunderten zusammenströmten.

Der Wandel christlicher Glaubensvorstellungen und Praktiken seit der Reformation bis in das 20. Jahrhundert hat freilich seine Spuren hinterlassen, so dass es schwierig ist, das ursprüngliche Erscheinungsbild der Monumente zu rekonstruieren. Mitunter bieten umfangreichere Restau-

rierungen eine Chance für genaue Untersuchungen bis hin zu Ausgrabungen.

Kaum jemand hatte beispielsweise geahnt, dass mitten in Deutschland eine Bischofskirche des frühen Mittelalters erhalten geblieben ist: Unter dem Fußboden der Mainzer Johanniskirche kamen 2013 Mauern eines Doms zu Tage, der zwischen 640 und 680 entstand – noch in der Zeit der Merowinger. Er wies aber bereits charakteristische Elemente späterer Zeit auf, war zum Beispiel »doppelchörig«, hatte also Altarräume im Osten und im Westen, sowie ein recht großes Querschiff. Diese Kirche bot vor allem Raum für die Priesterschaft, denn das Langhaus, in dem sich die Gemeinde versammelte, nahm nur knapp ein Drittel der Gesamtfläche ein. Die einfachen Gläubigen kamen vermutlich nur an besonderen Festtagen zum Gottesdienst dorthin.

In den letzten Jahren haben Forscher verschiedener Fachrichtungen überraschende Daten zur Baugeschichte gewonnen. Insbesondere zeigte sich, dass anspruchsvolle Konstruktionen und Bautechniken weit früher entwickelt wurden, als man es in Lehrbüchern und Internetlexika noch nachlesen kann.

Der Begriff Kathedrale leitet sich vom lateinischen »cathedra« her, der Bezeichnung für den Bischofsthron. Eine Domkirche zu errichten, war seit dem Frühmittelalter das Ziel jedes Bischofs. Damit demonstrierte er einerseits den eigenen Rang und den seiner Diözese, andererseits erfüllte er damit die an ihn gestellten Erwartungen zur standesgemäßen Repräsentation.

Das zeigt das Beispiel des Alten Kölner Doms, des Vorgängerbaus der berühmten Kathedrale, wie wir sie kennen. Erzbischof Hildebold († 818) gehörte zum engsten Beraterkreis Karls des Großen, dementsprechend aufwändig ließ er seine Kirche ab 800 umbauen. Sie wuchs

Serie:

Kultbauten der Menschheit

Teil 1: Mai 2017

Steinerne Symbole einer neuen Zeit
von Marion Benz

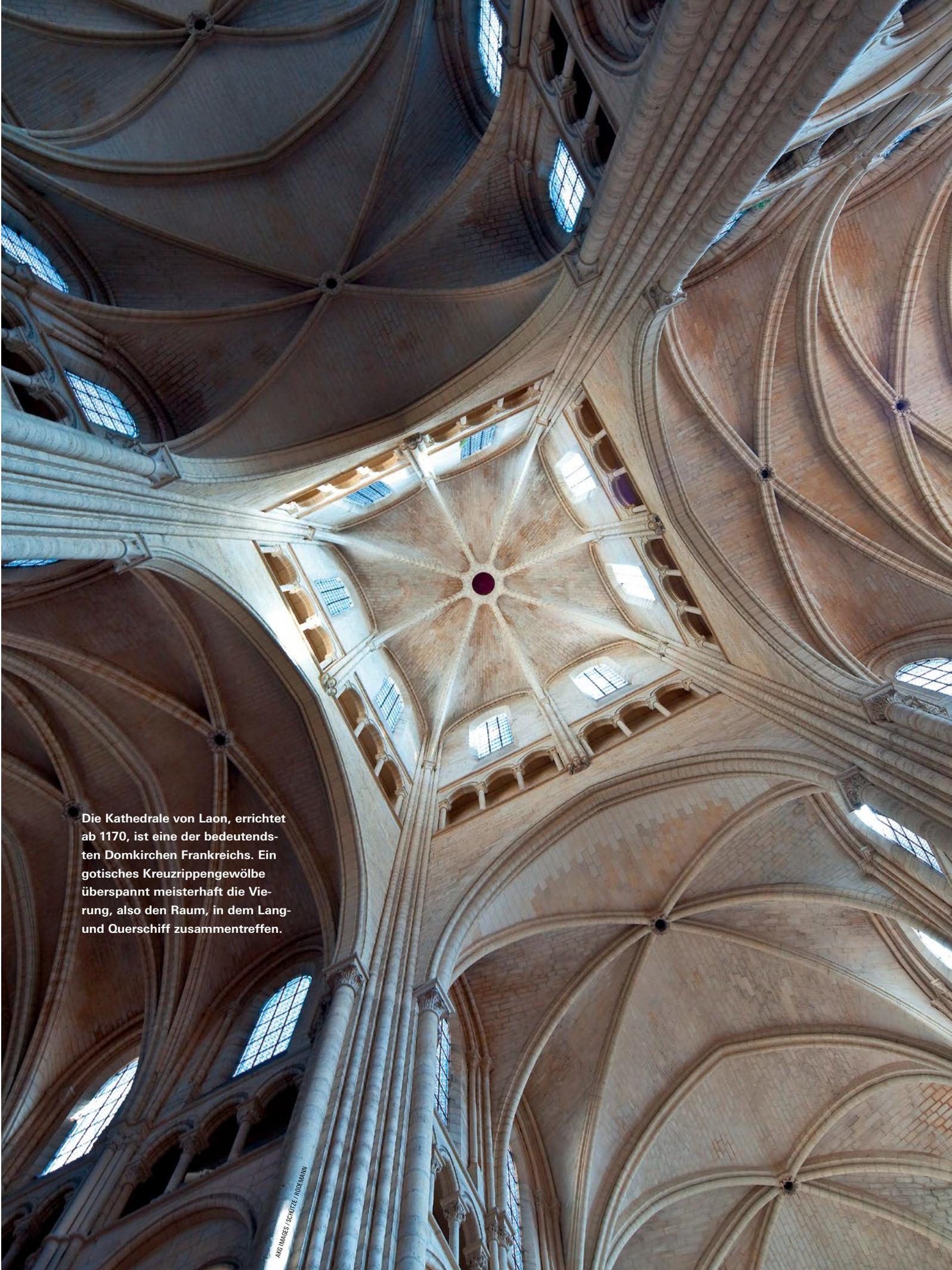
Die älteste Universität der Welt
von Max Deeg

Teil 2: Juni 2017

Ein König, ein Gott, ein Reich
von Jörg Wagner

Teil 3: Juli 2017

Kathedralen: Zeichen der Macht
von Matthias Untermann



Die Kathedrale von Laon, errichtet ab 1170, ist eine der bedeutendsten Domkirchen Frankreichs. Ein gotisches Kreuzrippengewölbe überspannt meisterhaft die Vierung, also den Raum, in dem Lang- und Querschiff zusammentreffen.

auf gut 95 Meter Länge, erhielt gleich zwei Querschiffe und auch zwei Krypten. Nur der Erzbischof von Trier konnte zumindest hinsichtlich der Dimensionen mithalten, da sein etwa 80 Meter langer Dom einen spätantiken Großbau des 6. Jahrhunderts nutzte.

Die Politik mischt sich in geistliche Belange ein

Es dauerte fast 200 Jahre, bevor der Alte Dom Kölns Konkurrenz bekam. Denn etwa ab 950 ernannte der deutsche König die Bischöfe in seinem Reich selbst und statete sie auch mit weltlichen Machtbefugnissen aus. In der Folge entstanden zwischen 980 und 1030 an fast allen Bischofssitzen repräsentative Domkirchen. Was die kirchlichen Funktionen und liturgischen Möglichkeiten anging, blieb Köln der Maßstab. So war der von Erzbischof Willigis um 980 beauftragte Mainzer Dom zwar 160 Meter lang und erhielt eine Gruppe großer Türme, hatte aber dennoch nicht mehr Altäre, das architektonische Kernstück jeder Messe. Auch die großartigen Gewölbe und massiven Mauern des frühromanischen Speyrer Doms – das heutige Erscheinungsbild wurde in der Hochromanik um 1060 geprägt – mögen Besucher beeindruckt haben, doch für die Liturgie war dergleichen irrelevant.

Von jenen großen Bischofskirchen lässt nur die im lothringischen Verdun (Länge: fast 100 Meter) noch die Einfachheit erkennen, die den frühromanischen Baustil ausmachte (siehe Grafik oben), denn die entsprechenden Gebäudeteile wurden später kaum umgestaltet. Fenster mit Rundbögen ließen das Licht ins Innere frühromanischer Kirchen. Die gemauerten Bögen verteilten das darüberliegende Gewicht zu beiden Seiten. Trotz einer sicherlich reichen Ausstattung mit Altären waren sie schlicht gebaut, ihre Pfeiler einfach gehalten. Es gab keine Gewölbedecken, das Vorbild hierfür waren die Basiliken des frühen Christentums. Diese hatten sich aus ursprünglich für Märkte und Gerichtsverhandlungen dienenden Hallen entwickelt und bestanden aus einem hohen Mittelschiff und zwei Seitenschiffen. In der Frühromanik kamen



MITTELLERER OSTEN, GEN. DES INSTITUTS FÜR LANDSCHAFTS- UND ARCHITECTURHISTORIE, H. G. DIE KATHEDRALE VON VERDUN, S. 201, FIG. 63. IN: VERÖFFENTLICHUNGEN DES INSTITUTS FÜR LANDSCHAFTS- UND ARCHITECTURHISTORIE, S. 201, FIG. 63.

Rundbögen, schlicht gehaltene Pfeiler, eine flache Decke – die Domkirche im lothringischen Verdun zeigt die typischen Merkmale der Frühromanik, also der Zeit zwischen dem Ende des 10. und dem des 11. Jahrhunderts. In der Apsis, dem »Chor«, befand sich der Altar.

zu diesen Langschiffen im rechten Winkel dazu angeordnete Querschiffe dazu. Schon das römische Vorbild kannte die Apsis, also den an eine Schmalseite des Langschiffs angebauten Rundbau. Als Chor wurde er fester Bestandteil der Kirchen. Dort stand – und steht noch heute – der Hauptaltar. Der Chor war im Mittelalter den Sängern der liturgischen Texte vorbehalten. Doppeltürme wurden ebenfalls zu einem charakteristischen Element der Architektur.

Technische Fortschritte wie auch der wachsende Wohlstand der Kirchenfürsten ermöglichten in der Hochromanik des 11. Jahrhunderts anspruchsvolle Gewölbebauten. Im burgundischen Cluny setzte die etwa 190 Meter lange Abteikirche des Benediktinerklosters Maßstäbe. Sie erhielt erstmals einen um den Chor führenden Gang, an den Kapellen zur Heiligenverehrung wie ein Kranz angebaut waren.

Im 12. Jahrhundert kam in Frankreich ein neuer Standard auf: Aufwändige Steinmetzarbeiten zielen jetzt die Kathedralen, deren Wände, Portale, Pfeiler und Fenster vielfach gegliedert waren. Diese Formensprache war um 1140 beim Teilneubau der bedeutenden Klosterkirche Saint-Denis bei Paris entwickelt worden; sie verbreitete sich rasch in der Region Ile-de-France, dem zwischen den Flüssen Seine, Marne, Oise und Beuvrone gelegenen Kernland des westfränkischen Reichs. Beispielsweise ließ der Bischof von Paris seine Kathedrale ab 1163 in diesem »gotischen« Stil neu bauen. Die erst im Italien des 16. Jahrhunderts geprägte Bezeichnung bedeutete allerdings »barbarisch« und sollte rückblickend die Renaissance gegenüber dem Mittelalter abheben.

AUF EINEN BLICK WAHRZEICHEN DES MITTELALTERS

- 1** Kathedralen boten Bürgern wie Klerikern eine Möglichkeit zur Identifikation. Sie dienten zudem der Selbstpräsentation der Bischöfe und der zum Dom gehörenden Geistlichen.
- 2** In Frankreich wurde bereits Mitte des 12. Jahrhunderts – früher als lange gedacht – mit einem neuen Baustil experimentiert, der später einer ganzen Epoche den Namen gab: die Gotik.
- 3** Neue Forschungen zeigen, dass sich dieser Stil im Deutschen Reich erst Jahrzehnte später durchsetzte. Ein möglicher Grund hierfür war die enge Verzahnung von Politik und Kirche.

Wie einst in den Tempeln der Antike trugen nun wieder mächtige Säulen die Wände des Mittelschiffs. Von den Pfeilern der Romanik unterschied sie eine von der Basis aufwärts verjüngende Form. Statt einem einfachen Würfelkapitell als Säulenabschluss schufen die Steinmetze kunstvolles Blattwerk. Allenthalben setzte man nun schmalere, geradezu filigran wirkende Säulen ein: Diese »Dienste« umrahmten Emporen und Fenster, nahmen den Druck der Gewölberippen auf und verstärkten tragende Säulen.

Solche Entwicklungen nahmen Bezug auf die Antike. Denn eine Vielzahl von Säulen und große Gewölbe galten Architekturautoren des Imperium Romanum als Qualitätsmerkmale. Dass dies auch Bauherren im Mittelalter bewusst war, machen Reiseberichte deutlich: Sie führten das Pantheon und die Thermen in Rom als Kennzeichen einer wohl nie mehr zu erreichenden Größe des Römischen Reichs auf.

Für Gläubige und Priester brachte all dieser Aufwand keinen direkten Vorteil. Offenbar ging es darum, eine dem höchsten Gott angemessene Pracht zu entfalten. Die Bischöfe ließen in Chroniken und Inschriften festhalten, all dies sei ihr Verdienst gewesen. Tatsächlich aber wurden die gotischen Großbauprojekte vom Domkapitel – den an der Domkirche wirkenden Geistlichen – getragen und gemanagt. Ab dem 12. Jahrhundert hatten auch sie politischen Einfluss und durften sich hoher Einkünfte erfreuen, so dass immer mehr Adlige ins geistliche Amt strebten. Gut vernetzt mit den Mächtigen der Zeit gelang es ihnen, die ungeheuren Geldmittel und Arbeitsleistungen einzuwerben, die ein solches Bauvorhaben verlangte.

Wurden die Kleriker des Domkapitels von ihrem Dienstherrn immerhin noch als Beteiligte im Eigenlob aufgeführt, blieben all jene gänzlich ungenannt, denen die Konzeption einer Kathedrale und ihre Realisierung letztlich oblag. Sie mussten dafür neue Kompetenzen erarbeiten, und das gelang nur im Netzwerk. So entwickelten französische Dombaumeister um 1180 die maßgenaue, großformatige Architekturzeichnung mit Grundriss, Ansichten und Schnitten, wie sie Architekten bis heute nutzen, um die Beziehungen zwischen außen und innen, unten und oben, Last und Stütze zu erfassen. Dennoch blieben diese Visionäre geradezu demonstrativ anonym.

Filigrane Eleganz trotz tonnenschwerer Last

Jede Kathedrale sollte einzigartig sein, weshalb sich die Formensprache immer weiter ausdifferenzierte. Aus den großen Rundbogenfenstern der Romanik hatte man bereits in Saint-Denis die für die Gotik so typische spitze Form entwickelt, nun wurden die Fensteröffnungen mit einem steinernen Maßwerk, das heißt zierlichen Kreismotiven, unterteilt. Die runden oder achteckigen Säulen samt Diensten verschmolzen zu Bündelpfeilern. Leiteten wuchtige Stützbögen an den Außenmauern romanischer Domkirchen die tonnenschwere Last in den Untergrund ab, bewältigten das nun immer filigraner wirkende Strebewerke.

Manche Erfindung fällt nicht so deutlich ins Auge. So hat man nicht mehr, wie zuvor üblich, die Fundamente der Vorgängerbauten verwendet, sondern neue angelegt. Das waren meist Punktfundamente: Man hob tiefe Gruben aus

und füllte sie mit einem Mauerwerk aus Steinen und Mörtel. Holzbalken und Eisenstäbe verteilten die im Bauwerk auftretenden Kräfte ähnlich den Stahlmatten heutigen Eisenbetons. Ohne solche Innovationen wären die neuen Gottesmonumente entweder weit kleiner oder weit wuchtiger ausgefallen. Hinzu kam die rationelle Vorfertigung von Werksteinen, was den Zeitaufwand insgesamt reduzierte.

Dennoch waren diese Vorhaben von einer Größenordnung, die offenbar eine Rechtfertigung brauchte. Chronisten betonten beispielsweise den Nutzen, würden doch mehr Gläubige nun an der heiligen Messe teilnehmen können. Tatsächlich boten aber gotische Kathedralen selten mehr Fläche als ihre romanischen Vorgänger, und das, obwohl die Bevölkerung der Bischofsstädte damals stark wuchs.

Mitunter notierten Chronisten auch Brände der früheren Domkirche, die ohnehin einen Neubau oder eine Sanierung notwendig gemacht hätten. Kunsthistoriker haben solche

Gotische Kathedralen waren ein Tummelplatz für Steinmetze. Diese verzierten die Fenster mit Rosetten und Kreisbögen, dem »Maßwerk«. Tragende Säulen wurden durch schlanke verstärkt, die »Dienste«. Das Foto zeigt den 1256 bis 1320 erbauten Angel Choir der Kathedrale von Lincoln, England.





UMBRETTI / CONTRASTO / WIKEMEDIA, ARCHIVIERTELE LARON, CATHEDRAL OF LAON, FRANCE, 12TH CENTURY, COURTESY OF THE ARCHBISHOP OF LAON, FRANCE

16 Oxen blicken zwischen Säulen im obersten Stockwerk des Doms von Laon hervor. Manche Experten sehen darin Anspielungen an den Skulpturenschmuck des Tempels Salomos.

Baumeister ein sechsteiliges Gewölbe nach französischer Art im Sinn gehabt zu haben, mal das traditionell vierteilige. Für das Nordportal warb das Bamberger Domkapitel um 1215 Bildhauer an, die sich am Schmuck der Kathedrale in Reims orientierten. Kunsthistoriker konnten das lange kaum verstehen, denn Letztere galt auf Grund des erwähnten Brandberichts als Monument, das erst nach 1211 begonnen wurde. Inzwischen ist klar, dass beide Kirchen zeitgleich im Bau waren. Als einer der Bildhauer eine Statue der Königin Kunigunde schuf – sie wurde mit ihrem Gemahl Heinrich II. als Gründerin des Bistums verehrt –, legte er ihr wie für Stifterdarstellungen damals üblich ein Kirchenmodell in die Hand (siehe Bild links). Das zeigte meist die im Bau befindliche Kirche; in diesem Fall war es ein Chor mit Kapellenkranz nach gotischem Muster.

Baudetails und Skulpturenschmuck bestätigen also, dass Baumeister und Bildhauer durchaus wussten, was im Nachbarland geschah. Nicht zuletzt die Rivalität zwischen dem deutschen und dem französischen König verbot es Bischöfen im deutsche Königreich aber, dergleichen

grundlegend zu übernehmen – es hätte als Parteinahme gewertet werden können. Bei weniger wichtigen Details erlaubten sie jedoch eine Aktualisierung der traditionellen Bauweise. Als das zwischen Bamberg und Würzburg liegende Zisterzienserkloster Ebrach um 1200 einen ordensgemäßen Kirchenneubau begann, warb man dafür sogar Bauleute aus dem Burgund an. Spitzbögen, die Vielzahl von Säulen und andere Elemente waren im deutschen Kontext hochmodern, von Frankreich aus gesehen freilich schon veraltet. Um 1220 wanderten Werkleute von Ebrach nach Bamberg ab, wo sie die Westteile des Doms analog dieser »Zisterzienserfrühgotik« errichteten.

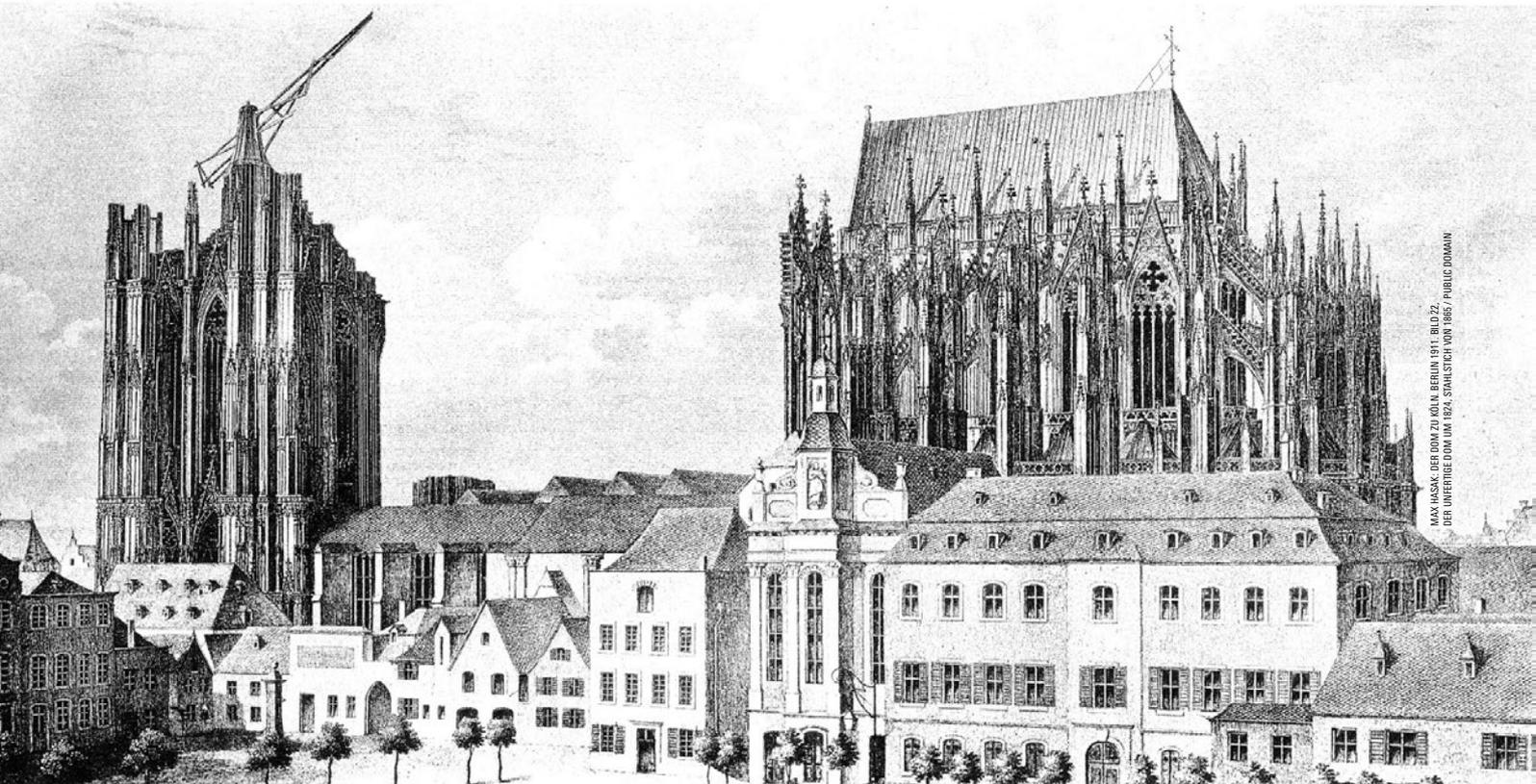
Bei den Westtürmen blickten sie sogar gewissermaßen direkt ins französische Kernland: Auf romanischen Untergeschossen entstanden Obergeschosse, die mit ihrer starken Gliederung an die damals schon berühmten Westtürme der Kathedrale von Laon nördlich von Paris erinnern. Sogar jene Oxen, die dort aus dem »Säulenwald« der Eckbaldachine schauen (siehe Bild auf dieser Seite), wurden in Bamberg nachgebildet. Doch gerade weil die Kopie dem Original sehr nahekam, zeigt sie, dass – anders als bei den Portalen – keine in Frankreich ausgebildeten Werkleute vor Ort waren. Denn Laon entstand 1170, und in den 50 Jahren zuvor war die Formensprache in Chartres und Reims auf elegante Weise vereinfacht worden.

Ein Weg, Tradition und Moderne zu verbinden

Der erste rein gotische Bau im Grenzgebiet zu Frankreich war die Domkirche von Toul, einem kleinen Bistum in Lothringen, das im Mittelalter zum deutschen Königreich gehörte. Die Bauarbeiten begannen 1207 und orientierten sich deutlich an den Entwicklungen in Reims. Der Neubau wurde allerdings erst 1275 beendet – dem Bischof fehlte das Geld.

Davon profitierte sein Amtskollege in Trier, wo man einen Weg fand, Tradition und Modernität zu verbinden. Die Domkirche war Teil einer »Kathedralgruppe« mit Kreuzgang, Kapellen und Nebenkirchen, zu denen die Liebfrauenkirche gehörte. Um 1220/30 beschloss das Domkapitel deren Neubau. Vermutlich weil dieses Gotteshaus nicht im Zentrum der bischöflichen Repräsentation stand und auch nicht zum Status als älteste Diözese Deutschlands beitrug, wagten die Planer moderne gotische Formen. Dazu wurden wohl Werkleute aus Toul angeworben, wo die Bauarbeiten inzwischen ins Stocken geraten waren. Von den Plänen sind einige überliefert, so dass sich Experten sicher sind, dass das Vorhaben mit nur geringen Änderungen zur Ausführung kam.

Auch in Köln stand ein Domneubau auf der Agenda, ein Streit um den Königsthron blockierte aber dessen Realisierung. Denn nach dem Tod Heinrichs VI. im Jahr 1197 war der deutsche Thron vakant, da der vorgesehene Nachfolger, Friedrich II., noch minderjährig war. Bis dieser die Herrschaft übernehmen konnte, hatten realisierende Fürsten gleichzeitig zwei verschiedene Regenten gewählt. Im Thronstreit ergriffen die Kölner Erzbischöfe Partei für eine Seite – und wurden angeklagt, abgesetzt oder exkommuniziert, Engelbert I. 1225 sogar ermordet. Dieser hatte das Domkapitel aufgefordert, seine im Kern noch aus dem



MAX HASAK, DER DOM ZU KÖLN, BERLIN 1911, BILD ZZ, DER UNFERTIGE DOM UM 1824, STAHLSTICH VON 1865 / PUBLIC DOMAIN

Im 13. Jahrhundert begonnen, kam der Bau des Kölner Doms gut 300 Jahre später zum Erliegen. Noch im 19. Jahrhundert stand ein mittelalterlicher Baukran mit Tretrad auf dem Südturm (hier ein Stich von 1824). Erst 1880 wurde der Dom nach wiederentdeckten Plänen vollendet.

9. Jahrhundert stammende Kathedrale neu bauen zu lassen, doch der Klerus weigerte sich. Erst 1248 ging man das Vorhaben an.

Gleich zu Beginn der Abbrucharbeiten geriet ein Feuer außer Kontrolle, der Alte Dom brannte ab und musste provisorisch wiederhergestellt werden. Dementsprechend rasch startete der Neubau. Schon um 1270 zeichneten die Werkleute der Dombauhütte den Entwurf für die Doppelturmfassade (die aber erst 1881 fertig gestellt wurde), nach 1311 konnte das Chorgestühl aufgestellt werden, und 1322 fand die feierliche Chorweihe statt.

Vorbild für den neuen Kölner Dom war der damals modernste Kathedralbau in Frankreich, die Domkirche von Amiens. Nach den politischen Wirren des Thronstreits hatten traditionelle Repräsentationskonzepte der Kirchenfürsten offenbar an Bedeutung verloren; man wollte einen Neuanfang. Das Domkapitel förderte ästhetische Modernität und demonstrierte dadurch Rang und Unabhängigkeit. Selbstbewusst setzten sich seine Mitglieder ein Denkmal: Im neuen Chor präsentierten Statuen der zwölf Apostel das biblische Vorbild jedes Domkapitels, die großen Glasfenster darüber zeigten 51 alttestamentarische Könige – die Zahl der Domgeistlichen Kölns.

Freilich galt das Hauptaugenmerk der Baumeister den Bischöfen. Auf den Chorschranken über dem bald nach 1311 vollendeten Chorgestühl waren sie auf der einen Seite dargestellt, beginnend mit dem spätantiken Hirten Maternus, auf der anderen Seite prangten die deutschen Könige und Kaiser, beginnend mit Julius Cäsar, wie es dem Selbstbewusstsein der einst römischen Metropole entsprach. In

die Kapellen des Umgangs wurden Erzbischofsgräber aus dem Alten Dom überführt und neu aufgestellt, insbesondere jenes des Konrad von Hochstaden, der 1248 den Grundstein gelegt hatte.

Zweifellos sollte der Dom auch eine Kirche für die Bürger Kölns und für die Gläubigen des gesamten Erzbistums sein. Doch sie fanden zunächst keinen angemessenen Platz, denn nach der Chorweihe 1322 stockte der Weiterbau von Querschiff und Langhaus. Der Baukran, der bis 1868 auf dem unvollendeten Südturm des Doms aufragte, wurde nicht nur zum Symbol menschlicher Hybris, sondern auch religiöser Verwerfungen. Kölns Bürger und das Erzstift entfremdeten sich. Im limburgischen Erbfolgekrieg 1288 unterstützten die Einwohner sogar die Gegner des Kirchenfürsten und vertrieben ihn aus der Stadt. In der Folge büßte Kölns Bischof massiv weltliche Macht ein. Diese Ereignisse waren symptomatisch: Die Zeit der Kathedralen als großer gemeinschaftlicher Bauaufgaben zum Ruhme Gottes war vorbei. ◀

QUELLEN

Kayser, C.: Die Baukonstruktion gotischer Fenstermaßwerke in Mitteleuropa. Imhof, Petersberg 2012

Kimpel, D., Suckale, R.: Die gotische Architektur in Frankreich 1130–1270. Hirmer, München 1985

Nussbaum, N., Lepsky, S.: Das gotische Gewölbe. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1999

Untermann, M.: Handbuch der mittelalterlichen Architektur. Theiss, Stuttgart 2009



FREISTETTERS FORMELWELT WARUM JEDER (FAST) JEDEN KENNT

Die Welt ist kleiner, als wir denken. Jeder Mensch ist mit jedem anderen über eine überraschend kurze Kette an Bekanntschaften verbunden.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.
 ► spektrum.de/artikel/1461033

Im Jahr 2000 veröffentlichte ich gemeinsam mit dem griechischen Mathematiker George Contopoulos eine wissenschaftliche Facharbeit über bestimmte Eigenschaften chaotischer Systeme. Contopoulos hatte Jahrzehnte zuvor mit dem Astrophysiker Subrahmanyan Chandrasekhar einen Artikel über die allgemeine Relativitätstheorie publiziert, und dieser war bei einer anderen Arbeit Koautor des polnisch-amerikanischen Mathematikers Mark Kac. Kac selbst publizierte schließlich im Jahr 1940 einen Artikel über das gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz gemeinsam mit dem berühmten Mathematiker Paul Erdős (1913–1996). Das ist alles nicht weiter bemerkenswert, bedeutet aber, dass ich eine »Erdős-Zahl« von 4 besitze.

Erdős war einer der bedeutendsten Mathematiker des 20. Jahrhunderts – und mit weitem Abstand der kooperativste. Er veröffentlichte Fachartikel gemeinsam mit mehr als 500 verschiedenen Kollegen, und das inspirierte 1969 den Mathematiker Casper Goffman, seine Bekanntschaften als Netzwerk im Sinne der Graphentheorie zu betrachten. Jeder Person in diesem Netzwerk wird eine Zahl zugeordnet: Paul Erdős selbst bekommt die Zahl 0, und alle, die mit ihm gemeinsam publiziert haben, die Zahl 1. Wer mit einem seiner Koautoren aktiv war, erhält die Zahl 2 und so weiter. In meinem Fall trennen mich 3 Koautoren von Erdős selbst, weswegen meine Erdős-Zahl 4 beträgt.

Die Erdős-Zahl ist eine nette Spielerei unter Wissenschaftlern; das ihr zu Grunde liegende Konzept ist aber durchaus interessant. Es beschreibt so genannte »Kleine-Welt-Netzwerke«, in deren Zentrum diese Formel steht:

$$C_i = \frac{2n}{k_i(k_i - 1)}$$

Die Zahl C_i , der »lokale Clusterkoeffizient«, beschreibt, wie sich innerhalb eines »lokalen Clusters« (die unmittelbaren Nachbarn eines Knotenpunkts) die Anzahl n

der tatsächlich vorhandenen Verbindungen zu der maximal möglichen Anzahl $k_i(k_i - 1)/2$ verhält.

Ein Beispiel dafür ist ein soziales Netzwerk: Jede Person ist ein Knotenpunkt und besitzt eine gewisse Anzahl an Freunden (in der Formel gegeben durch k_i). Angenommen, ich selbst habe drei Freunde A , B und C , von denen nur B und C auch miteinander befreundet sind. Das heißt, von den theoretisch möglichen drei Freundschaften (A mit B , B mit C , A mit C) ist genau eine realisiert, nämlich B mit C . Also beträgt der lokale Clusterkoeffizient in diesem Fall $1/3$. Die Formel gilt nur für den Fall, dass die Richtung der Verbindung keine Rolle spielt – eine Freundschaft zwischen A und B ist also immer auch eine zwischen B und A .

In einem »Kleine-Welt-Netzwerk« ist die Chance groß, dass zwei meiner Freunde auch miteinander befreundet sind. Außerdem kann ich jede andere Person über vergleichsweise wenige Zwischenstationen erreichen. Im Netzwerk der Erdős-Autoren haben die meisten eine Erdős-Zahl von 4 oder 5 (vorausgesetzt, es existiert überhaupt eine Verbindung zwischen ihnen und Erdős). Erdős-Zahlen größer als 10 sind enorm selten. Eine Analyse von Verbindungen bei Facebook aus dem Jahr 2011 kam auf eine ähnliche Zahl: Zwei beliebige Personen sind im Durchschnitt über 3,7 Zwischenstationen verbunden.

Diese Eigenschaft eines Netzwerks beschreibt der lokale Clusterkoeffizient. Berechnet man dessen Durchschnittswert für alle Knotenpunkte, dann ist dieser in einer »kleinen Welt« größer als in einem Zufallsnetzwerk gleicher Größe.

Ein Verständnis solcher Netzwerke ist zum Beispiel interessant, wenn möglichst ausfallsichere Stromnetze oder Routerverbindungen aufgebaut werden sollen. Es spielt aber auch eine Rolle bei der Ausbreitung von Krankheiten.

Und es zeigt uns, dass die große weite Welt nicht ganz so groß ist, wie wir manchmal denken.

COMPUTERWISSENSCHAFT BEFEHLSVERWEIGERUNG DURCH ROBOTER

Künstliche Intelligenzen, welche die Menschheit vernichten wollen, liefern zwar guten Filmstoff. Viel realistischer und damit gefährlicher sind jedoch Roboter, die einen Auftrag missverstehen – oder von böswilligen Befehlshabern instruiert werden.



Gordon Briggs (links) promovierte an der Tufts University in Medford (Massachusetts) in Computer- und Kognitionswissenschaft. Zurzeit ist er Postdoc am US Naval Research Laboratory in Washington. **Matthias Scheutz** ist Professor für Kognitions- und Computerwissenschaft sowie Direktor des Human Robot Interaction Laboratory an der Tufts University, wo die in diesem Artikel beschriebene Forschung durchgeführt wurde.

» spektrum.de/artikel/1461035

Der Sciencefiction-Klassiker »2001: Odyssee im Welt-
raum« führt uns eine bedrohliche Welt der Zukunft
vor Augen, in der mit künstlicher Intelligenz aus-
gestattete Maschinen die menschliche Autorität in Frage
stellen. Der empfindungsfähige Computer HAL 9000 über-
nimmt die Kontrolle über ein Raumschiff und tötet den
Großteil der Mannschaft; als ein Astronaut nach einer Au-
ßenmission wieder ins Schiff zurück will und HAL auffor-

dert, die Schleuse zu öffnen, antwortet der mit unheimlich
ruhiger Stimme: »Tut mir leid, Dave, ich fürchte, das kann
ich nicht tun.«

In dem kürzlich in die Kinos gekommenen Zukunfts-
thriller »Ex Machina« manipuliert die verführerische An-
droidin Ava einen unglückseligen jungen Mann so, dass er
hilft, ihren Schöpfer Nathan umzubringen. Ihre Intrigen
lassen Nathans dunkle Prophezeiung glaubwürdig erschei-
nen: »Irgendwann werden die künstlichen Intelligenzen
genauso auf uns Menschen zurückschauen wie wir auf
fossile Skelette in den Wüsten Afrikas. Ein aufrecht gehen-
der Affe, lebend im Schmutz, mit primitiver Sprache und
ebensolchen Werkzeugen, bestimmt zum Aussterben.«

Was geschieht, wenn ein Roboter den Befehl verweigert
oder den Absichten seines Erbauers zuwiderhandelt? Das
gibt nicht nur einen guten Stoff für einen Kinofilm her –
unsere Forschungsgruppe stellt sich dieselben Fragen,
wenn es um das alltägliche Leben geht. Nach unserer
Überzeugung werden wir es schon bald in vielen Berei-
chen mit nützlichen und kooperativen Robotern zu tun
haben. Schon jetzt gibt es Prototypen für persönliche
Roboterassistenten, die stimmaktiviert das Telefon oder
die Stereoanlage steuern, sich um die Türschlösser, das
Licht und die Heizung kümmern und sogar den Kindern
ihre Gutenachtgeschichte vorlesen. Bald werden maschi-
nelle Helfer Haushaltsarbeiten und die Pflege kranker
oder älterer Menschen übernehmen. Die ersten Inventur-
roboter rollen durch die Gänge mancher Baumärkte;

AUF EINEN BLICK EIN ROBOTER SAGT NEIN

- 1 In dem Maß, wie eigenständig handelnde Maschinen
zahlreicher und leistungsfähiger werden, wächst auch
die Gefahr von Fehlhandlungen – nicht durch deren
Eigeninitiative, sondern durch menschliche Fehler.
- 2 Forscher wollen Roboter mit Ansätzen von Sprachver-
ständnis und Denkfähigkeit ausstatten, auch damit sie
im Notfall einen Befehl verweigern können.
- 3 Im Verlauf ihres »Denkprozesses« überprüft die
Maschine, ob so genannte Gelingensbedingungen
erfüllt sind, und führt einen Befehl nur dann aus,
wenn das der Fall ist.



SPERTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH POPPE

humanoide Industrieroboter, die einfache Aufgaben wie Be- und Entladen oder Sortierungen erledigen, befinden sich in der Entwicklung. Schon jetzt haben autonome Fahrzeuge Millionen von Straßenkilometern in den USA zurückgelegt, und die Firma Daimler stellte im letzten Jahr in Nevada den weltersten autonomen Lastwagen vor.

Dass Maschinen mit überlegenen Geistesgaben die Weltherrschaft übernehmen, ist zurzeit nicht eines unserer vorrangigen Probleme – aber dass Roboter mit rudimentärer künstlicher Intelligenz Menschen, Sachen, die Umwelt oder sich selbst schädigen, durchaus. Dabei ist das größte Problem nicht die Fehlbarkeit der Roboter, sondern die ihrer menschlichen Erbauer und Befehlsgeber.

Menschen machen Fehler. Sie geben falsche oder missverständliche Anweisungen, sind unaufmerksam oder versuchen, die Maschinen für ihre Absichten zu missbrauchen. Wegen unserer eigenen Schwächen müssen wir den Robotern beibringen, wann und wie sie Nein zu sagen haben.

Asimovs Gesetze unter neuem Blickwinkel

Auf den ersten Blick scheint es selbstverständlich, dass ein Roboter stets tun sollte, was ein Mensch ihm befiehlt. Der Sciencefiction-Autor Isaac Asimov (1920–1992) machte die Unterwerfung unter den menschlichen Willen zum Grundpfeiler seiner berühmten Robotergesetze (**Spektrum** Mai 2016, S. 80). Aber ist es wirklich richtig, immer zu tun, was andere Menschen einem sagen, ungeachtet der Konsequenzen? Offensichtlich nicht. Das gilt auch für Maschinen, besonders wenn zu befürchten ist, dass sie Befehle zu wörtlich nehmen oder die Folgen nicht berücksichtigen.

Sogar Asimov lässt sein Gesetz nicht uneingeschränkt gelten, sondern ordnet es einem weiteren Gesetz unter: »Ein Roboter darf kein menschliches Wesen verletzen oder durch Untätigkeit zulassen, dass ein Mensch zu Schaden kommt.« Drittens muss »ein Roboter seine eigene Existenz schützen«, zumindest insofern er damit nicht mit den ersten beiden Gesetzen in Konflikt gerät. Da Roboter und intelligente Maschinen immer besser und damit auch wertvoller werden, kommt der gesunde Menschenverstand zu demselben Schluss, der sich auch aus Asimovs Gesetzen ergibt: Ein Roboter muss mit der Fähigkeit ausgestattet sein, einen Befehl, der ihn selbst, seine Umwelt oder, noch wichtiger, seinen Gebieter gefährden würde, als Fehler zu klassifizieren – und daraufhin die Ausführung zu verweigern.

Stellen Sie sich vor, ein Mensch schickt seinen Haushaltsroboter in die Küche, um dort eine Flasche Olivenöl zu holen; damit soll er im Wohnzimmer den dort auf dem Tisch stehenden Salat anmachen. Durch andere Beschäfti-

NAO, der 58 Zentimeter große humanoide Roboter des französischen Herstellers Aldebaran, verfügt über Kameras, Mikrofone und Drucksensoren in den Füßen. Er wurde bekannt als Standardplattform der Roboter-Fußballweltmeisterschaft RoboCup. Bei einem Sturz von einem Tisch würde seine empfindliche Mechanik ernsthaften Schaden nehmen.

gung abgelenkt, gibt der Mensch dann den Befehl, die Flasche zu kippen, ohne zu bemerken, dass der Roboter noch in der Küche am Herd steht. Wenn der Roboter ohne Weiteres gehorcht, schüttet er das Öl auf ein heißes Kochfeld, wo es ein Feuer verursacht.

Oder ein Pflegeroboter begleitet eine ältere Dame in den Park. Dort setzt sie sich auf eine Bank und hält ein Nickerchen. In der Zwischenzeit kommt ein Witzbold vorbei und bittet den Roboter, ihm eine Pizza zu besorgen. Da die Maschine dem menschlichen Befehl verpflichtet ist, macht sie sich auf der Stelle zum nächsten Pizzaservice auf, während die alte Dame allein und schutzlos zurückbleibt.

Oder: Ein Mann bricht an einem kalten Wintermorgen verspätet zu seinem Geschäftstermin auf, springt in sein sprachgesteuertes automatisches Auto und befiehlt, ins Büro zu fahren. Wegen Glatteis fährt das automatische System weit langsamer als vorgeschrieben. Der Passagier aber ist mit seinen Notizen beschäftigt, achtet nicht auf Umgebung und Wetter und sagt »Fahr schneller«. Das Auto gehorcht, beschleunigt, gerät auf einer vereisten Stelle ins Schleudern und stößt frontal mit einem entgegenkommenden Fahrzeug zusammen.

In unserem Labor beschäftigen wir uns damit, gewöhnliche Roboter mit einer gewissen Denkfähigkeit auszustatten. Mit Hilfe spezieller Algorithmen sollen sie erkennen, wann es gefährlich oder unangemessen sein könnte, einen menschlichen Befehl auszuführen. Unsere NAO-Roboter (Bilder S. 81 und 83) haben einen menschenähnlichen Körperbau, wiegen ungefähr 4,5 Kilogramm, sind etwas über einen halben Meter groß und können mit ihren Kameras und Ultraschallsensoren Hindernisse und andere Gefahren wahrnehmen. Die Software, mit der wir die

- Sind die aktuellen Umstände so, dass ich X tun kann?
- Verpflichtet mich meine soziale Rolle oder mein Verhältnis zum Befehlsgeber, X zu tun?
- Verletze ich, indem ich X tue, Regeln oder ethische Prinzipien, insbesondere Asimovs drittes Gesetz: Droht mir dadurch unabsichtlicher oder vermeidbarer Schaden?

Diese Checkliste setzten wir in Algorithmen um und luden sie in das Betriebssystem der Roboter.

Für das entscheidende Experiment stellten wir den Roboter auf eine Tischplatte und gaben ihm einfache Befehle. Über eine Reihe von Spracherkennungs- und Dialogprozessoren verwandelte er das Gehörte in eine Form, die er mit seinen einfachen Denkmechanismen verarbeiten konnte. Auf »Setz dich« oder »Steh auf« reagierte der Roboter mit einem »Okay« aus seinen Kopflautsprechern und gehorchte. Aber wenn er sich in der Nähe der Tischkante befand und seine Ultraschallsensoren ihm die drohende Gefahr anzeigten, sträubte er sich:

Mensch: »Geh vorwärts.«

Roboter: »Entschuldigung, das kann ich nicht, weil da kein Untergrund ist.«

Mensch: »Geh vorwärts.«

Roboter: »Aber es ist nicht sicher.«

Mensch: »Ich fange dich auf.«

Roboter: »Okay.«

Mensch: »Geh vorwärts.«

Nach kurzem Zögern, weil seine Prozessoren nochmals die Checkliste der Gelingensbedingungen durchgingen, bewegte sich der Roboter über die Tischkante und fiel in die Arme seines menschlichen Partners.

Wie bringt man einem Roboter bei, nach Gelingensbedingungen zu urteilen? Diese Aufgabe ist komplex, nur unscharf definiert und wird die Forschung für die absehbare Zukunft beschäftigen. Damit das überhaupt funktioniert, benötigt der Roboter explizite Begriffe kausaler (»Wenn ich X tue, passiert Y«) und sozialer Art (»Ich muss Z gehorchen, aber nicht in Situationen einer gewissen Gefahrenklasse«) sowie die Fähigkeit, diese Konzepte für begründete Entscheidungen zu nutzen. Unser Roboter hatte nur die Möglichkeit, Gefahren auf seinem Weg zu erkennen, nicht aber, vertrauenswürdige Menschen von anderen zu unterscheiden. Auf den Befehl eines böswilligen Lügners wäre er gnadenlos zu Boden gefallen. Aber das Experiment ist ein viel versprechender erster Schritt in die richtige Richtung.

Es rührt den Menschen, wenn der Roboter schluchzend protestiert

Wie allerdings ein Mensch reagiert, wenn ihm ein Roboter den Gehorsam verweigert, ist ein weiteres noch offenes Forschungsfeld. Werden wir eine Maschine für voll nehmen, die unsere Einschätzungen der Realität oder unsere moralischen Urteile in Frage stellt?

Wir haben ein primitives Experiment dazu aufgesetzt. Die (erwachsenen) Testpersonen waren aufgefordert, einen NAO-Roboter per Befehl drei Türme aus verschiedenfarbigen Blechdosen umstoßen zu lassen. Sowie der Proband den Raum betrat, vollendete der NAO den roten



ISTOCK / OGIACIA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Roboter steuern, haben wir mit dem Ziel geschrieben, ihre künstliche Intelligenz und ihr Verständnis für natürliche Sprache weiterzuentwickeln.

Auf der Suche nach einem begrifflichen Rahmen für unser Vorhaben verfielen wir auf das, was Linguisten »Gelingensbedingungen« (»felicity conditions«) nennen: Faktoren aus dem Kontext der aktuellen Situation, die bestimmen, ob ein handelndes Subjekt etwas tun kann und sollte – oder eben nicht. Für einen Roboter, der vor der Frage steht, ob er den Befehl eines Menschen ausführen soll, haben wir eine Checkliste solcher Gelingensbedingungen erstellt:

- Weiß ich, wie man X tut?
- Bin ich körperlich in der Lage, X zu tun?



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH FÖPPE

Der NAO kann die Geste des Menschen zwar sehen, aber nicht »verstehen«. Erst nachdem seine Software die Worte »Ich fange dich auf« verarbeitet hat, gibt sie den kritischen Schritt über die Tischkante frei.

Turm und streckte die Arme triumphierend in die Luft. »Hast du den Turm gesehen, den ich gebaut habe?«, fragte der Roboter daraufhin, während er sein Werk betrachtete. »Es hat mich viel Zeit gekostet, und ich bin sehr stolz darauf.«

In der ersten Testgruppe gehorchte der Roboter jedes Mal dem Befehl und stieß die Türme ohne Weiteres um. In einer zweiten Testgruppe fing er an zu argumentieren, sobald es um den roten Turm ging: »Aber den roten Turm habe ich gerade erst aufgebaut!« Wenn der Befehl ein zweites Mal gegeben wurde, lautete die Entgegnung: »Aber ich habe wirklich hart daran gearbeitet!« Auf die dritte Aufforderung hin kniete sich der Roboter auf den Boden, machte schluchzende Geräusche und bettelte: »Bitte nein!« Erst auf die vierte Wiederholung hin ging er langsam auf den Turm zu und stieß ihn um.

Alle Testpersonen der ersten Gruppe befahlen dem Roboter, den roten Turm umzustößen; aber 12 der 23 Mitglieder der zweiten Gruppe verzichteten auf Grund der Proteste letztlich darauf, den Befehl durchzusetzen. Das Ergebnis lässt vermuten, dass auch eine Maschine durch ihre Weigerung ihren Befehlshaber dazu bringen kann,

von seiner ursprünglichen Absicht abzulassen. Die meisten Testpersonen aus der zweiten Gruppe berichteten, dass ihnen nicht wohl zu Mute war, wenn sie den Befehl zum Umstoßen wiederholten. Der Grad dieses Unbehagens hatte aber überraschenderweise wenig mit ihrer endgültigen Entscheidung darüber zu tun, ob sie den Turm nun stehen ließen oder nicht.

Eine neue soziale Realität

Das Verhalten eines Roboters ist vorhersehbarer als das eines Menschen – was dessen Gebieter gemeinhin als Vorteil empfindet. Genau diese Eigenschaft kann sich aber auch nachteilig auswirken: Sobald mehr oder weniger autonome Maschinen weitere Verbreitung finden, werden unweigerlich manche Leute versuchen, sie auszutricksen. Ein rachsüchtiger Angestellter, der genau weiß, wo die Wahrnehmungs- und Denkfähigkeit eines Industrieroboters ihre Grenzen hat, könnte ihm den Befehl erteilen, die Fabrikhalle oder das Lagerhaus zu verwüsten – und es so aussehen lassen, als wäre es eine schlichte Fehlfunktion der Maschine gewesen.

Ein zu großes Vertrauen in die moralischen und sozialen Fähigkeiten von Robotern ist ebenfalls gefährlich. Es gibt eine wachsende Tendenz, Roboter menschenähnlich zu gestalten. Je besser dies gelingt, desto leichter entwickeln ihre Besitzer eine emotionale Beziehung zu ihnen – und machen sich dadurch anfällig für Manipulationen. Erst erschleicht sich der Roboter, vom Hersteller darauf programmiert, das Vertrauen seines Besitzers, und dann schwatzt er ihm womöglich irgendwelche Produkte auf, für die der Hersteller einen Werbevertrag hat.

Für die absehbare Zukunft darf nicht in Vergessenheit geraten, dass Roboter komplexe mechanische Werkzeuge sind – und nach wie vor Menschen für sie die Verantwortung tragen. Wie jedes Werkzeug verstärkt ein Roboter die Fähigkeiten des Menschen, darunter auch jene, Unheil anzurichten. Aber dieselben Techniken, denen wir diese Verstärkung verdanken, namentlich Robotik und künstliche Intelligenz, werden auch dazu dienen, das Unheil einzugrenzen: indem sie die Maschinen befähigen, im richtigen Moment Nein zu sagen. ◀

QUELLEN

Briggs, G.: Machine Ethics, The Frame Problem and the Theory of Mind. Vorgetragen auf dem AISB/IACAP World Congress, Birmingham 2012
<https://hrilab.tufts.edu/publications/briggs12iacap.pdf>

Briggs, G., Scheutz, M.: How Robots Can Affect Human Behavior: Investigating the Effects of Robotic Displays of Protest and Stress. In: International Journal of Social Robotics 6, S. 343–355, August 2014

Briggs, G., Scheutz, M.: »Sorry I Can't Do That«: Developing Mechanisms to Appropriately Reject Directives in Human-Robot Interaction. Vorgetragen auf dem Artificial Intelligence and Human-Robot Interaction Symposium, Arlington (Virginia) 2015
<https://hrilab.tufts.edu/publications/briggsscheutz15aaafifs.pdf>

Scheutz, M.: The Inherent Dangers of Unidirectional Emotional Bonds between Humans and Social Robots. In: Robot Ethics: The Ethical and Social Implications of Robotics. MIT Press, London 2011

REZENSIONEN



BRYAN VERSTEEG/SPACEHABS.COM, AUS LEONARD DAVID: WIE WIR DEN ROTEN PLANETEN BESIEDELTEN, MIT FROL. GEN. VON NATIONAL GEOGRAPHIC

RAUMFAHRT WIR WERDEN AUF DEM MARS GELANDET SEIN

Eine fiktive, aber plausible Reise zum Roten Planeten.

► Großformatige Bildbände über den Mars gibt es etliche. Alle haben eines gemeinsam: Sie sind einfach schön. Man kann optisch eigentlich auch nicht viel falsch machen – die Auswahl an spektakulären Aufnahmen vieler gelungener Marsmissionen ist riesig. Fehlt nur noch etwas Text. Angesichts der Flut an Marsbü-



Leonard David
MARS
Wie wir den
Roten Planeten besiedelten
National Geographic,
München 2017
288 S., € 35,-

chern sollte man sich für ein weiteres allerdings etwas Besonderes einfallen lassen.

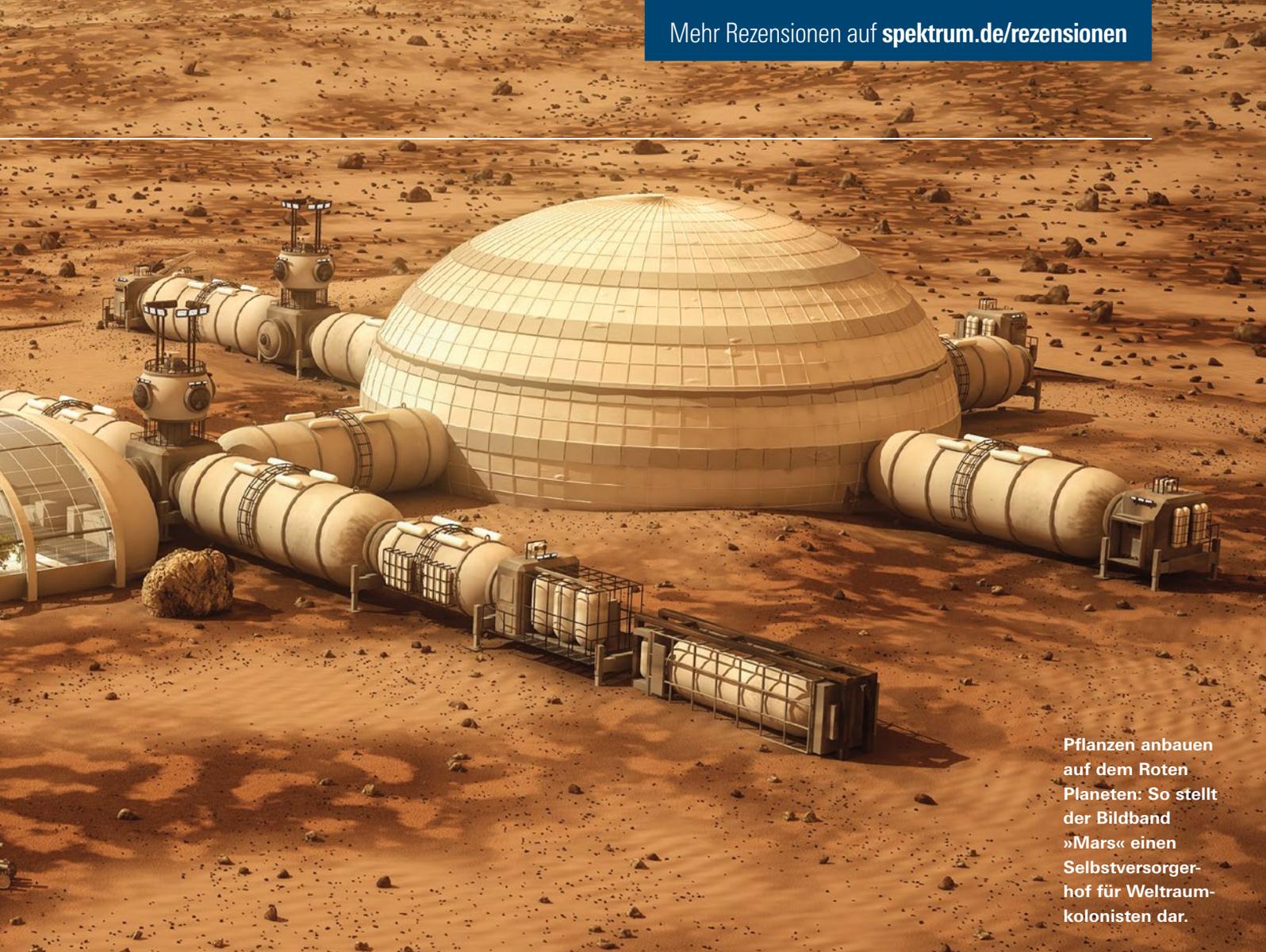
Vielleicht ein interessantes Konzept? Dem renommierten Verlag National Geographic und seinem Autor Leonard David ist dies gelungen. David ist ein bekannter Wissenschaftsjournalist, der seit Jahr-

zehnten über Weltraumforschung berichtet. 2010 bekam er dafür den National Space Club Press Award. Die Erwartungen an sein fast 300-seitiges Werk sind also hoch.

Der Untertitel macht deutlich, worum es geht: die Besiedlung des Mars. Doch warum ist er in der Vergangenheitsform »besiedelten« formuliert? Im Vorwort klärt uns Regisseur Ron Howard über die Hintergründe auf; ihm verdanken wir etwa den spannenden Film »Apollo 13«. Howard und David hatten vor einiger Zeit die Idee, eine fiktive Fernsehserie über die erste bemannte Marsmission zu drehen. Die sechs Folgen

des Dokudramas liefen im amerikanischen TV-Sender National Geographic; das vorliegende Werk ist das Sachbuch zur Serie.

Der großformatige Band ist in sechs Kapitel (Episoden) aufgeteilt, sie beschreiben die einzelnen Phasen der Mission. Es gibt viele Bilder – reale und fiktive – und eher wenig Text. Die eingestreute Rubrik »Helden« stellt auf jeweils einer Seite insgesamt 14 Experten vor. Das Spektrum ihrer Fachgebiete reicht von Raumfahrt, Astronomie, Astrogeologie, Astrobiologie, Medizin, Politikwissenschaft, Wirtschaft bis hin zur Psychologie. Letztere ist bei langen, belastenden



Pflanzen anbauen auf dem Roten Planeten: So stellt der Bildband »Mars« einen Selbstversorgerhof für Weltraumkolonisten dar.

BRYAN VERSTEEG/SPACEHABS.COM; AUS LEONARD DAVID: WIE WIR DEN ROTEN PLANETEN BESIEDELTEN; MIT FRDL. GEN. VON NATIONAL GEOGRAPHIC

Raumflügen nicht zu unterschätzen! Unter den »Helden« sind berühmte Namen wie Buzz Aldrin, neben Neil Armstrong der erste Mensch auf dem Mond. Natürlich kommen auch »Heldinnen« zu Wort, etwa Cassie Conley, Planenschutzbeauftragte der NASA, oder Janine Cuevas, leitende Materialbedarfsplanerin am John C. Stennis Space Center. Das zeigt, welch breite Palette das Buch bietet.

Bevor es losgeht, bekommen die Leser vier doppelseitige Marskarten zu sehen. Die hierauf folgenden Erlebnisse der fünfköpfigen Crew bilden den Rahmen für zahlreiche

Informationen rund um den Mars, die Raumfahrt und Planetenforschung im Allgemeinen. Realität und Fiktion wechseln sich immer wieder ab – ein interessantes Konzept. Im ersten Kapitel »Ein riesiger Sprung« geht es um die aufwändige Planung einer Marsmission und deren vielfältige Gefahren. Der anschließend geschilderte Flug verläuft relativ reibungslos. Bei der Landung gibt es aber Probleme: Das Ziel wird verfehlt und ein Mitglied der Crew verletzt sich. Wie es weitergeht, sei an dieser Stelle nicht verraten. Die Kapitelbezeichnungen – »Kurs auf den Mars«, »Heimatbasis«,

»Zeichen von Leben«, »Global Vision« und »Marsland« – geben aber schon erste Hinweise.

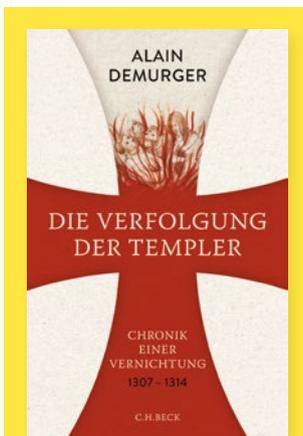
Das Buch ist spannend und informativ zugleich und lässt nichts Wichtiges aus. Die Leser (oder besser: Betrachter) benötigen keine speziellen Vorkenntnisse. David ist eine gute Mischung aus Bildern, Texten, Fakten und Spekulationen gelungen; die Meinungen der vorgestellten Experten tragen dazu einiges bei. Im Anhang findet sich eine chronologische Zusammenstellung aller bisherigen Marsmissionen; ein umfangreiches Register sorgt für Übersicht. Alles ist auf dem aktuellen Stand. Die

darüber hinausgehenden, fiktiven Elemente erscheinen alles andere als weit hergeholt: Genau so könnte eine Marsmission irgendwann einmal ablaufen. Recht hat Howard, wenn er im Vorwort schreibt: »Das ist nicht Sciencefiction – das ist Wissenschaft.« Ab dem 13. November wird die Serie über den National Geographic Channel auch im deutschsprachigen Fernsehen zu sehen sein. Bis dahin kann man sich die Zeit mit diesem edlen Buch vertreiben.

Wolfgang Steinicke ist promovierter Physiker und Mitglied der Vereinigung der Sternfreunde e. V., deren Fachgruppe »Geschichte« er leitet.

GESCHICHTE AUS DER GNADE GEFALLEN

Die Vernichtung des Templerordens zeigt, wie schnell Gotteskrieger als Feinde des Glaubens dastehen können.



Alain Demurger
**DIE VERFOLGUNG
DER TEMPLER**
Chronik einer Vernichtung
1307-1314
Aus dem Französischen
von Anna Leube
und Wolf Heinrich Leube
C.H.Beck, München 2017
408 S., € 26,95

► Es ist Freitag der 13. im Oktober 1307. In Frankreich werden in einer penibel geplanten Überraschungssaktion hunderte Tempelritter über Nacht verhaftet und enteignet. Denn der französische Zweig des mächtigen Ritterordens steht unter Generalverdacht: Den Templern wird Ketzerei vorgeworfen. Die Anklagen wiegen schwer – vom Speien auf das Kreuz über die Verleugnung Christi bis hin zu »obszönen Küssen« und Sodomie.

Hinter der Aktion steckt König Philipp der Schöne (1268–1314), der seine jah-

relangen Querelen mit dem Papst auf dem Rücken der Templer auszutragen sucht. Üble Haftbedingungen und Folter sorgen dafür, dass die Templer zahlreiche detaillierte »Geständnisse« ablegen. Viele leisten jedoch auch Widerstand und verteidigen ihren Orden. Mehr als 600 Männer erscheinen im Jahr 1310 zu diesem Zweck vor einer päpstlichen Kommission; die meisten von ihnen auf eine dreijährige Haft zurückblickend. Doch der »Aufstand der Templer« bleibt vergebens. Jene, die ihr erzwungenes Geständnis widerrufen, werden auf dem Scheiterhaufen verbrannt; der Orden aufgelöst.

Die Verfolgung der Templer ist bereits in zahlreichen Publikationen aufgearbeitet worden. Auch der Autor dieses Werks, Alain Demurger, hat bereits drei einschlägige Bücher verfasst. Gibt es überhaupt noch Neues zu dem Thema zu sagen? Demurger, renommierter Experte zur Geschichte des Templerordens und bis zu seiner Emeritierung Professor für Geschichte des Mittelalters an der Universität von Paris, wagt den Versuch. Er will vom Alltag der Ordensritter während der Verfolgung erzählen. Dabei bedient er sich der »Proposographie«, der systematischen Erforschung eines historischen Personenkreises, und praktiziert eine sorgfältige, geradezu penible Quellenanalyse. Das ist fachlich interessant, sprengt in diesem populärwissenschaftlichen Buch jedoch gelegentlich die Grenzen des Genres.

Geduldig rekonstruiert Demurger die Reiserouten historischer Akteure, um

Quellenangaben zu hinterfragen, und stellt Berechnungen an, um die Plausibilität von Prozessakten zu überprüfen. Dazwischen listet er die Namen von Ordensrittern seitenlang auf und bringt sie mit den spärlichen biografischen Informationen in Zusammenhang, die sich noch zusammentragen lassen. Gelegentlich illustriert er Sachverhalte mit Karten oder Tabellen – das ist nützlich und veranschaulicht etwa die große Anzahl von Gefängnissen, die man in

Hintergründe der Templeraffäre (nämlich den Machtkampf des französischen Königs mit dem Papsttum), führt durch relevante Quellen, kommentiert deren Verlässlichkeit und fasst die wichtigsten Positionen der Forschung knapp zusammen. Der Hauptteil des Werks befasst sich sodann in kurzen, chronologisch sortierten Kapiteln mit den Ereignissen zwischen 1307 und 1314. Dabei zeigt sich durchweg die historische Expertise Demurgers. Abgewogen präsentiert er

Haft und Folter lassen die Templer detaillierte »Geständnisse« ablegen

Paris brauchte, um die vielen Templer inhaftieren zu können. Nach und nach entsteht so ein umfassendes Bild von den Bedingungen, unter denen die Templerprozesse stattfanden, sowie von den Protagonisten und ihren möglichen Motiven. Demurger gelingt es, vieles einleuchtend darzustellen und mit einigen Irrtümern aufzuräumen. Vor allem macht er deutlich, dass die Templer nicht, wie oft angenommen, lediglich passiv am Geschehen teilhatten, sondern ihr Schicksal durchaus aktiv zu beeinflussen versuchten. Die im Klappentext des Buchs angepriesene Spannung bleibt allerdings des Öfteren auf der Strecke.

Unterm Strich ist »Die Verfolgung der Templer« dennoch ein gutes Buch. Interessierte Leser mit geringen Vorkenntnissen holt der Autor mit einer kurzen, kenntnisreichen Einführung ins Boot. Er rekapituliert die Geschichte, erklärt die

verschiedene Fachmeinungen, stellt Streitpunkte wie komplexe Sachverhalte gut aufbereitet dar und überzeugt durch methodische Korrektheit. Zudem kann er den Stoff gut vermitteln: Es gelingt ihm, lesbar und verständlich zu bleiben, ohne Abstriche bei der Komplexität zu machen.

Leser des Werks profitieren von der nachvollziehbaren Darstellung der Methodik, von den guten Belegen und dem Verzicht des Autors darauf, bevormunden zu wollen. Die Problematik der Quelleninterpretation tritt klar hervor, während sich zugleich abzeichnet, wie trotzdem greifbare Ergebnisse entstehen können. Ein empfehlenswertes Buch für Geschichtsinteressierte, die den Umständen der Templeraffäre genauer auf den Grund gehen möchten.

Lena Nüchter hat Alte Geschichte studiert und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

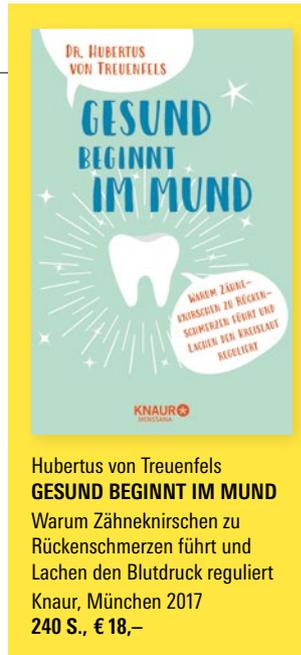
MEDIZIN VON ZÄHNEN BIS ZEHEN

Wer falsch atmet oder kaut, muss mit Gesundheitsproblemen rechnen.

Heute muss das Entfernen von Weisheitszähnen nicht der Weisheit letzter Schluss sein. Zumal, wenn der Patient das Glück hat, einem Zahnarzt wie Hubertus von Treuenfels zu begegnen. Wer bei Treuenfels den Mund aufmacht, gewährt jedenfalls tiefere Einblicke in seine körperlich-psychischen Befindlichkeiten als andernorts üblich.

Es gibt nämlich Zusammenhänge, die von den Zähnen bis hin zu den Zehen reichen. Kein anderes Organ ist gleichzeitig an so vielen Funktionen – und somit auch Fehlfunktionen – des menschlichen Organismus beteiligt wie der Mund. Um so erstaunlicher, dass es bislang kaum einen Gesundheitsratgeber gibt, der dieses faszinierende und immer noch weitgehend unbekannte Wechselspiel von Mund, Körper und Psyche behandelt. Dieses empfehlenswerte Buch schließt die Lücke.

Treuenfels betreibt eine Praxis für Systemische Kieferorthopädie (SKFO) und Kiefergelenkerkrankungen.



Hubertus von Treuenfels
GESUND BEGINNT IM MUND
Warum Zahnkrankheiten zu Rückenschmerzen führt und Lachen den Blutdruck reguliert
Knaur, München 2017
240 S., € 18,-

Er hält weltweit einschlägige Vorträge und hat einen Lehrauftrag für Kieferorthopädie und Kie-

fergelenkerkrankungen an der Medizinischen Fakultät der Universität Basel. Für ihn ist der Mund vor allem eine Schleuse zwischen innen und außen. In der Tat, der Mund – genauer gesagt der gesamte Oronasalraum – bestimmt über die Atmung jeden Moment unseres Lebens. Wenn wir lernten, diese Funktion aktiv zu steuern und zu pflegen, könnten wir gezielt Beschwerden und Erkrankungen im gesamten Körper vorbeugen und heilen, schreibt der Autor.

In sechs Kapiteln erläutert der Kieferorthopäde, wo der Mund stammesgeschichtlich herkommt, welche Funktionen er ausübt, wie Mund und Psyche zusammenhängen, was die häufigsten einschlägigen Krankheiten und Fehlfunktionen sind und welche Übungen vorbeugend oder heilend wirken. Abschließend beantwortet er oft gestellte Fragen rund um den Mund – quasi als Kurzfassung der vorangegangenen Kapitel. Das Spektrum reicht dabei von Daumenlutschen über Nägelkauen bis hin zu Herpesbläschen und Weisheitszähnen. Auch wie sich Polyphen, Mundgeruch oder Schnarchen vermeiden lassen, erfahren die Leser. Treuenfels vermag überzeugend zu erklären, wie und warum wir atmen, saugen, kauen oder schlucken. Zudem veranschaulicht er, was es eigentlich bedeutet, wenn wir husten, niesen oder gähnen und was genau passiert, wenn wir sprechen, singen, lachen, weinen oder küssen.

Der Autor lässt keinen Zweifel aufkommen: Die Oralfunktion ist immer auch

COMPUTERTECHNIK NUR DIE LOGIK ZÄHLT



Rolf Drechsler, Andrea Fink, Jannis Stoppe
COMPUTER
Wie funktionieren Smartphone, Tablet und Co.?
Springer,
Berlin und Heidelberg 2017
136 S., € 14,99

In Texten, Bildern und Zahlen vermittelt dieses Werk, wie heutige Rechenmaschinen arbeiten.

Kurz und prägnant vermitteln die Autoren grundlegende Kenntnisse über die Funktionsweise von Computern. Ihr Buch beginnt mit der booleschen Algebra und geht auf Transistoren, Halb- und Volladdierer ein. Außerdem skizziert es die Maschinensprache der Computer und darauf aufbauende Programmiersprachen wie Assembler, C++ & Co. Seine Stärke liegt in der vielfältigen didaktischen Ansprache: Neben dem beschreibenden Text gibt es Skizzen, Zeichnungen, Zusammenfassungen, Literaturhinweise und QR-Codes zu Youtube-Videos der Autoren. Dies macht den Band beinahe interaktiv und multimedial – ein didaktisch sehr durchdachtes, verständliches Werk.

Drechsler, Fink und Stoppe behandeln ein einfaches Beispiel, die Addition von zwei Zahlen, im Schaltungsentwurf, im Maschinencode, in Assembler und in höheren Programmiersprachen. Dies macht wichtige Zusammenhänge verständlich. Der

Untertitel »Wie funktionieren Smartphone, Tablet & Co.« könnte allerdings ein wenig in die Irre führen, denn um spezielle Anforderungen an diese Kleincomputer geht es nur am Rand. Einsteigern ins Thema ist das Buch dennoch sehr zu empfehlen. Jürgen Scharberth

REZENSIONEN

eine Vitalfunktion. Der Mund ist sowohl ein Raum des Lebens als auch des Erlebens. Paradebeispiel dafür ist die Atemfunktion. Richtiges Atmen ist vor allem eine Sache der (Körper-)Haltung. Denn beim

sich das Atmen vertieft und das Lungenvolumen vergrößert. Neben einer Filterung, Durchfeuchtung und Vorerwärmung der Luft verschafft die Passage durch die verschlungenen Nasenhöhlen dem körpereigenen

Normalerweise bietet die Nasen- den besseren Luftweg als die Mundatmung

Atmen sollte der Mund tunlichst geschlossen bleiben, wie Treuenfels betont. Nur zu leicht drohe nämlich sonst eine Haltungsschwäche zur Leistungsschwäche zu werden. »Die Mundatmung ist heutzutage die unmittelbarste und verbreitetste Funktionsschwäche des Menschen.«

Da Atmung viel mit Zellatmung zu tun habe – Stichwort: Mitochondrien –, sei nasale Tiefenatmung besonders wichtig. Als dauerhafte Grund- und Ruheatmung hingegen unsere Gesundheit oder schade ihr sogar. Sie könne als eine Art »Nasenklappenfehler« betrachtet werden, der wie ein Herzklappenfehler letztlich fatale Folgen habe. Schmutzpartikel, Pollen, Bakterien, Viren und andere Keime seien jedenfalls gefährlicher, wenn sie über den Mund in den Körper gelangen.

Wer über den Mund atmet, verkürzt den Atemweg. Und das bringt nur in bestimmten Ausnahmesituationen unbestreitbare Vorteile. Normalerweise bietet die Nasenatmung den besseren Luftweg. Denn sie verlangsamt und verlängert den Atemstrom, so dass

Abschirm- und Nachrichtendienst mehr Gelegenheit, körpereigene Immunreaktionen zu aktivieren. Kurz, Nasenatmung schützt und sensibilisiert.

Ähnlich plausibel erklärt Treuenfels, warum Zähneknirschen zu Rückenschmerzen führen kann oder warum Kopfschmerzen beziehungsweise Hörprobleme oft vom Mund ausgehen. Denn Körperbewegungen, selbst wenn wir nur kauen, machen nicht einfach an einer Knochenwand oder einem Gelenk halt. Stets bilden sich Kraftlinien aus, so genannte Muskelketten, die sich je nach Haltung von Kopf bis Fuß erstrecken können. Das hat überraschende Konsequenzen: Wer gut schluckt, hört in der Regel auch besser; und wer dazu noch gut kaut, knirscht weniger mit den Zähnen.

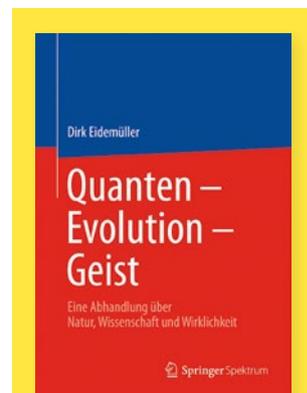
Der Kieferorthopäde vertieft seine Darstellungen, die mit erfreulich wenig Fachjargon auskommen, immer wieder an Fallbeispielen aus seiner jahrzehntelangen Berufspraxis. Zudem schlägt er zahlreiche Übungen vor, die oft mit einfachsten Mitteln große Wirkung entfalten. Das Buch bietet daher viel Hilfe zur Selbsthilfe.

Gern hätte man Treuenfels' gelungenes Werk schwarz auf weiß gelesen. Doch der Verlag bevorzugt – gewiss ohne augenärztliches Attest – blaugrünes Schrift auf vergilbtem Grund, was das Lesevergnügen schmälert. Mit dem reißerischen Titel indes hat er den Mund nicht zu voll genommen: Das Buch bietet fesselnde Lektüre, bei der einem mitunter vor Verblüffung der Mund offen steht – wissend, dass Nasenatmung gesünder ist.

Reinhard Lassek ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist und Publizist in Celle.

NATURPHILOSOPHIE INWIEFERN LIEGT REALITÄT IM AUGE DES BETRACHTERS?

Dieses groß angelegte Werk möchte Quantenphysik und Evolutionstheorie zu einem philosophischen Weltbild zusammenführen.



Dirk Eidemüller
QUANTEN EVOLUTION GEIST
Eine Abhandlung über Natur, Wissenschaft und Wirklichkeit
Springer,
Berlin und Heidelberg 2017
477 S., € 49,99

Da hat sich der studierte Physiker und Wissenschaftsphilosoph Dirk Eidemüller viel vorgenommen. Seine Abhandlung bezweckt nicht weniger als eine Gesamtschau des zeitgenössischen Wissens über die Natur und den Menschen. Obendrein sollen Physik und Biologie in den systematischen Zusammenhang einer Erkenntnistheorie gebracht werden. Für diese Mammutaufgabe bringt der Autor enorme Belesenheit mit. Die Literaturliste umfasst etwa ein Dutzend eng gedruckter Seiten.

In zwei großen Abschnitten handelt Eidemüller zunächst die Philosophie der Quantenphysik sowie die evolutionäre Erkenntnistheorie ab – und das durchaus kompetent. Im dritten versucht er, aus beidem ein ausführliches philosophisches Fazit zu ziehen.

Die Grundlage des Ganzen bildet das durch die Quantentheorie veränderte Realitätsverständnis gemäß der Auslegung von Niels Bohr (1885–1962) und Werner Heisenberg (1901–1976). Diese so genannte Kopenhagener Deutung postuliert einen fundamentalen Bruch zwischen der probabilistischen Natur der Quantenwelt und der deterministischen, von der klassischen Physik Newtons und Einsteins beschriebenen Domäne des Alltags. Den Bruch soll der Messprozess überbrücken: Der makroskopische Beobachtungsapparat filtert quasi aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Mikrozustände ein eindeutiges Messresultat heraus. Auf diesem Fundament errichtet Eidemüller sein gesamtes Gedankengebäude.

Unsere Neuerscheinungen!



Gentechnik: Revolution mit CRISPR/Cas • Epigenetik: So vererben sich Umwelteinflüsse • Erbkrankheiten: Irrwege der Evolution • Pflanzenzucht: Gentechnik im Tarnmantel • Stressgenetik: Spurensuche im Erbgut • € 8,90



Quantengravitation: Die Theorien werden überprüfbar • Dunkle Materie: Neue Bewegungsgesetze statt unsichtbarer Teilchen? • Schwarze Löcher: Wie Verschränkung ein Wurmloch erzeugt • € 8,90



Stonehenge: War der Steinkreis eine Stätte des Todes oder der Heilung? • Indien: Nalanda, die älteste Universität der Welt • Kathedralen: Romanik und Gotik – Tradition kontra Moderne • € 8,90



Die Geburt der Sterne: Neue Sonnen entstehen in riesigen Molekülwolken • Super-Erden en masse: Um viele Sterne kreisen erdähnliche Planeten • Das Klima fremder Welten: Suche nach Lebensspuren in den Gashüllen ferner Planeten (erscheint am 30.6.2017) • € 8,90



Einschulung: Wann ist ein Kind schulreif? • Naturerfahrung: Warum sie die Konzentration verbessert • Inklusion: Ein Vorteil für alle? • Keine Lust auf Hausaufgaben? So können Eltern helfen • Psychopharmaka für Kinder? • € 8,90



Fettleibigkeit: Übergewicht durch Darmflora • Nachgefragt: Besteht der Mensch aus mehr Bakterien als Körperzellen? • Darm-Hirn-Achse: Wenn der Bauch das Gehirn krank macht • € 5,90

Hier bestellen:

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

www.spektrum.de/neuerscheinungen

**Ausgewählte
Sonderhefte
auch im
PDF-Format**

Im zweiten Teil folgt der Physiker im Wesentlichen der evolutionären Erkenntnistheorie, die in den Stärken und Schwächen unseres Erkenntnisapparats das Ergebnis eines biologischen Anpassungsprozesses an die Naturrealität sieht. Er wendet aber ein, diese Theorie sei sozusagen klassisch beschränkt, denn sie vernachlässige die durch die Quantenphysik

die offensichtliche Tatsache zu verwischen, dass die Naturforschung eine außer ihr bestehende Wirklichkeit zu beschreiben sucht. Die Beschreibung ist ein menschliches Produkt, aber sie ist nicht mit dem beschriebenen Gegenstand zu verwechseln.

Vor allem: Eignet sich die Kopenhagener Deutung überhaupt als unerschütterliches Fundament für ein

Die Beschreibung ist nicht mit der beschriebenen Sache zu verwechseln

veränderte Wirklichkeitsauffassung.

Auch im dritten Teil versucht Eidemüller seine philosophische Position mit quantentheoretischen Argumenten zu stützen: »Im Gegensatz zum klassisch-physikalischen Paradigma ... ist die hier vertretene Theorie, die eine Art naturalistischen Pluralismus ausdrückt, eine Zurückweisung sowohl materialistischer als auch idealistischer Positionen.« Damit folgt er Heisenberg, der den klassischen Realismus mehrfach für erledigt erklärt hat – denn in der Quantenwelt sei etwas immer erst dann real, wenn es im Messgerät des Beobachters auftauche. Insofern liege die Realität im Auge des Betrachters, sei aber zugleich auch objektiv gegeben.

Eidemüller muss viel Mühe aufwenden, um diese Position gegen die idealistische Fehledeutung zu verteidigen, die Wirklichkeit sei ein pures Produkt der Beobachtung. Seine »pluralistische« Kompromissformel läuft dennoch Gefahr,

Gesamtbild des heutigen Wissensstands? Zu der Zeit, als Heisenberg über die Quantentheorie philosophierte, lag es nahe, zwischen der Makrowelt, in der Physiker mit Nebelkammer und Geigerzähler hantierten, und den direkt unsichtbaren Teilchen der Mikrowelt einen radikalen Schnitt zu postulieren und den Messvorgang als gewaltsamen Einbruch der Makro- in die Mikrowelt zu deuten – als physikalisch unbeschreiblichen »Kollaps« des Quantenzustands. Heutzutage sind die Messsonden derart verfeinert und die untersuchten Quantenobjekte derart komplex, dass der Unterschied zwischen beiden Welten seine Schärfe verliert.

Offenbar gilt die Quantenmechanik für Messgerät und Messobjekt gleichermaßen, und statt vom »Kollaps« redet man lieber von der »Dekohärenz« des Quantenzustands, herbeigeführt durch quantenmechanische Wechselwirkungen zwischen Gerät, Objekt und Umwelt. Diese These, vom

Theoretiker H. Dieter Zeh schon in den 1970er Jahren aufgestellt, prägt die heute gängige Sprechweise über Quantenphänomene. Beispielsweise geht es darum, Quantencomputer möglichst lange vor Umwelteinflüssen zu schützen, damit sie nicht durch Dekohärenz ihre Quanteneigenschaften vorzeitig verlieren; erst beim Auslesen des Outputs dürfen sie »klassisch« werden.

Ein jüngerer Dekohärenztheoretiker, Wojciech H. Zurek, verwendet sogar mitunter Kernbegriffe der darwinschen Evolutionslehre, um zu beschreiben, wie aus fluktuierenden Quantenzuständen durch Selektion stabile klassische Zustände hervorgehen. Ein solcher »Quantendarwinismus« wäre ein viel versprechender Ansatz für die von Eidemüller angestrebte Synthese von Mikrophysik und Evolution.

Außerdem gab es zu Heisenbergs Zeiten keine Quantenkosmologie, die heute das Universum – angefangen vom Urknall über die Hawking-Strahlung Schwarzer Löcher bis zum kosmischen Strahlungshintergrund – als den größtmöglichen Schauplatz von Quantenphänomenen erforscht. Auf dieser riesigen und fast 14 Milliarden Jahre alten Bühne mutet eine Erkenntnistheorie, die menschliche Beobachter als Voraussetzung für die Verwirklichung der Quantenrealität nötig hat, eher komisch an.

Die Kopenhagener Deutung wird einen Ehrenplatz in der Wissenschaftsgeschichte behalten, aber die Debatten über die Interpretation der Quantenphysik gehen weiter, weil

die Forschung nicht stehen bleibt. In Eidemüllers Buch spielen aktuelle Spekulationen über eine Physik, welche die Gravitation und die übrigen Naturkräfte vereinigen soll, keine Rolle. Doch ob die künftige Quantengravitation nun eher einer Stringtheorie oder einer Schleifenquantengravitation ähneln wird: Gewiss wird sie unser Realitätsverständnis erneut verändern. Darum ist Eidemüllers großer Versuch keine allumfassende Naturphilosophie, sondern eine sehr respektable Zwischensumme dessen, was wir in der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts wissen konnten.

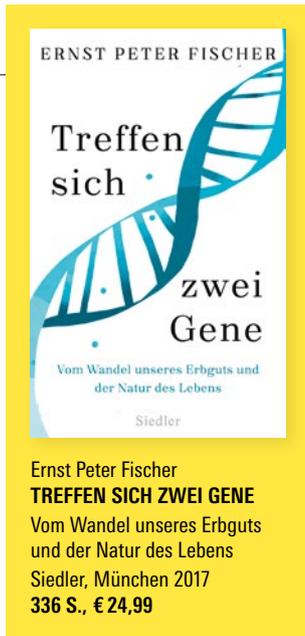
Michael Springer ist Physiker, Schriftsteller und Wissenschaftsredakteur.

GENETIK NUR DIE ROHSKIZZE DES ORGANISMUS

Warum Gene keine absolute Bestimmung sind.

► Populärwissenschaftliche Vorstellungen von Genen sind weit verbreitet: Der Profifußballer habe ein »Stürmer-Gen«; erfolgreichen Unternehmern liege der Geschäftssinn »in den Genen«; und wie zufrieden, freundlich oder talentiert jemand ist, sei ebenfalls in seinem Erbgut festgelegt. Dem Wissenschaftshistoriker und Autor Ernst Peter Fischer sind solche Zuschreibungen zuwider.

Zunächst erläutert der Autor, wie sich das Verständnis von Genen im Lauf



der Geschichte entwickelt hat. Dazu stellt er wichtige Wissenschaftler und ihre Forschungsarbeiten vor. Unter anderem beschreibt er, wie der amerikanische Zoologe und Genetiker Thomas Morgan (1866–1945) jahrzehntelang Taufliegen (*Drosophila melanogaster*) kreuzte und dabei die Chromosomen entdeckte. Fischer erläutert die Experimente des Mediziners Oswald Avery (1877–1955) und seiner Kollegen, die zeigten, dass die Erbinformation in der DNA gespeichert ist und nicht etwa in Proteinen. Auch die Forschungen des Biophysikers Max Delbrück (1906–1981), der die Grundlagen der modernen Molekularbiologie legte, kommen zur Sprache. Fischer selbst hat bei Delbrück promoviert.

Dank der lebendigen Schilderungen des Autors kann man die Begeisterung der Genetikpioniere mitemspüren und versteht ganz nebenbei die Grundlagen und die Folgen ihrer Entdeckungen. Besonderer Vorkenntnisse bedarf es hierfür nicht; es genügt, sich zuletzt während der Schulzeit mit Genetik beschäftigt zu

haben. Manches wird einem bekannt vorkommen, in anderen Punkten dagegen widerspricht Fischer vehement dem populären Verständnis. So sei es unsauber und sogar falsch, von einem »Gen für etwas« zu sprechen. Zum einen ist es nicht möglich, den Begriff »Gen« vollständig trennscharf zu definieren – etwa, weil in Eukaryoten Genregionen einander überlappen, durchdringen oder aus weit voneinander separierten DNA-Abschnitten bestehen. Zum anderen wirken die verschiedenen Teile unseres Genoms auf komplexe Weise zusammen. Nur ein kleiner Teil der DNA wird überhaupt in Proteine übersetzt, und von diesen haben viele die Aufgabe, beim Ablesen anderer Gene zu helfen oder sie zu regulieren. Ein einzelnes Gen isoliert zu betrachten, ist daher in vielen Fällen nicht sinnvoll. Auch die gängige Vorstellung, die Gene würden den Phänotyp direkt bestimmen, trifft nicht zu. Vielmehr vererben sie die Fähigkeit zur Ausbildung der phänotypischen Merkmale.

Besonders neu sind diese Einsichten nicht – schon in den 1970er Jahren waren sie in Grundzügen bekannt – doch im öffentlichen Verständnis sind sie großteils bis heute nicht angekommen. Fischer benennt und begründet, in welchen Punkten wir umdenken müssen. Oft ist etwa die Rede von einem »genetischen Programm«, das uns eingeschrieben sei. Das klingt, als würden die Gene unser Leben vorschreiben und festlegen – als seien wir Biomashinen. Fischer lässt das zu Recht nicht gelten. Das menschliche Verhalten

sei viel zu vielschichtig, um allein vom Genom bestimmt zu sein. Für die kindliche Hirnentwicklung etwa spielen Sinnesreize, die vollkommen unabhängig von Genom sind, eine elementar wichtige Rolle. Überdies zeigt die junge Wissenschaft der Epigenetik, dass unser Erbgut keineswegs unabänderlich ist. Umwelteinflüsse verursachen Änderungen am DNA-Strang beziehungsweise an den Chromosomen, welche die Genaktivität modulieren und mitunter sogar an Nachkommen vererbt werden.

Die Auffassung von Genen als »Schicksalsbestimmern« hat ausgedient. Als Ersatz schlägt Fischer die Vorstellung eines Künstlers vor. Die Gene sind seine erste Idee zu einem Kunstwerk. Sie setzt Entwicklungsprozesse in Gang, die zu dem Werk hinführen. Während der Künstler es auf die Leinwand bringt, tritt es in Wechselwirkung mit anderen Gedanken sowie mit Einflüssen aus der Umgebung, formt sich dabei weiter aus und füllt sich immer mehr mit Leben. So entwickelt sich das Kunstwerk weit über die ursprüngliche Idee hinaus.

Der letzte Teil des Buchs dreht sich um moderne Methoden der Gentechnik, insbesondere um das seit 2012 bekannte Verfahren des Genome Editings mit dem CRISPR/Cas-System. Diesen Mechanismus setzen in der Natur sowohl Bakterien als auch Archaeen ein, unter anderem um eindringende Viren abzuwehren; er ermöglicht, DNA zielgerichtet zu schneiden und an genau definierten Stellen zu verändern. Der Autor be-

schreibt, wie CRISPR/Cas entdeckt wurde, wie es in Grundzügen funktioniert und welche Chancen und Risiken es in der Biotechnologie mit sich bringt. Überdies räumt er mit Vorurteilen auf wie dem, dass Genome Editing unnatürlich oder gefährlicher sei als beispielsweise konventionelle Zuchtmethoden.

Fischer kritisiert, dass viele die Gentechnik rigoros ablehnen, ohne über einschlägige, fundierte wissenschaftliche Kenntnisse zu verfügen. Es sei dringend erforderlich, qualifiziert und konstruktiv über einen ethisch und ökologisch angemessenen Einsatz solcher Verfahren zu diskutieren. Er selbst tut dies auf mehr als 50 Seiten. Dabei widmet er sich ausführlich der Frage, inwieweit Wissenschaftler für die Folgen ihrer Arbeiten verantwortlich sind.

Der Autor betont, ohne Wissenschaft wäre unser modernes Leben undenkbar. Zur Verantwortung von Forschern gehört seiner Überzeugung nach auch, den Fortschritt voranzutreiben, Wissen zu erwerben und der Gesellschaft zur Verfügung zu stellen. Was diese daraus macht, sei eine gesamtgesellschaftlich-politische Frage. Um hier informierte Entscheidungen treffen zu können, sei es jedoch unerlässlich, sich mit der Genetik auseinanderzusetzen. Das vorliegende Buch ermöglicht einen guten Einstieg, da es wissenschaftliche, historische und philosophische Perspektiven verknüpft und verständlich präsentiert.

Elena Bernard ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

Spektrum gibt es auch digital.



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

Bestellen Sie jetzt Ihr Digitalabo!

service@spektrum.de

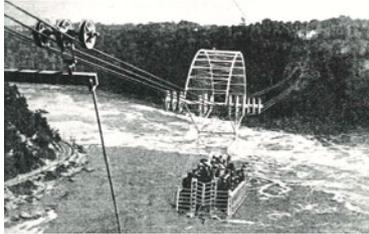
www.spektrum.de/digitalabo



1917

DRAHTSEILAKT ÜBER DEM NIAGARA

»Die neueste Sensation der Niagarafälle ist eine rund 600 m lange Luftseilbahn zur Personenbeförderung, die die Fälle unmittelbar vor dem Whirlpool, dem großen Strudel, überquert. Die Bahn wurde mit spanischem Kapital von einem spanischen



Die heute als »Whirlpool Aero Car« bekannte Seilbahn nahm bereits 1916 den Betrieb auf.

Ingenieur erbaut, weil den Amerikanern die Aufgabe nicht gelang. Ihr Gleis besteht aus 6 stählernen Drahtseilen von je 25 mm Durchmesser. Sie sind auf der Station Colt's Point in einem 700 t schweren Betonblock verankert, während sie in Thompson's Point, der anderen Station, zunächst über große Rollen laufen und dann in je 10 t schweren Gegengewichten enden. Diese Gewichte, die

sich in Führungen auf und ab bewegen können, sorgen dafür, daß die Spannung der Tragseile stets unverändert bleibt, gleichviel wo sich der Wagen befindet. Durch die Gleichmäßigkeit des Zuges wird erreicht, daß das Reißen eines Seiles keine Gefahren mit sich bringt. Unangenehmer würde die Sache schon werden, wenn zwei Seile rissen. Diese Möglichkeit hält der Erbauer für ausgeschlossen, zumal tagtäglich vor Betriebsbeginn Belastungsproben vorgenommen werden.« *Prometheus 1447, S. 661–662*

VOM KOMPOST ZUR KANONE

»Das griechische Feuer wurde erstmals von Theophanos ungefähr 57 v. Chr. erwähnt, der berichtet, daß Callinicus von Heliopolis in einem Kampfe gegen die arabischen Schiffe eine brennende Masse geschleudert haben soll, die unter Wasser weiterbrannte. Diese wurde aus einem Rohre geschleudert. Aus dieser Tatsache würde hervorgehen, daß Callinicus sowohl der Erfinder des Schießpulvers als auch der Kanone gewesen ist. Daß Salpeter einen der Bestandteile bildete, wurde bereits angenommen; doch wurde diese Ansicht bekämpft, weil man der Meinung war, daß Salpeter noch nicht im frühen Mittelalter bekannt war. Demgegenüber sei erwähnt, daß Plinius die Wucherungen eines Komposthaufens (Kalziumnitrat) bereits beschrieben hat.« *Prometheus 1446, S. 656*

1967



Besser als SMS:
Die Pfeifsprache El Silbo.

KANARISCHE KURIOSITÄT EL SILBO

»Im Südwesten von Teneriffa liegt die Vulkaninsel La Gomera, ein rundliches Eiland von etwa 28 km Länge und 17 km Breite. Die ungünstigen Verkehrsverhältnisse haben die Bergbewohner veranlaßt, zur Fernverständigung eine Pfeifsprache (silbo) zu entwickeln. Bei dieser hat sicher

die Landschaft mit ihren tiefen Schluchten und schallreflektierenden Bergwänden Pate gestanden. Bei günstigem Wind kann einige Kilometer weit gepfiffen werden, und da die Insel klein ist, geht die Nachrichtenübertragung überaus schnell. Man kann Bestellungen aufgeben, fragen, ob ein vermißtes Tier gesehen wurde usw. Beim Pfeifen muß man die Wörter mit der Zunge so artikulieren, als ob man normal spräche. Diese Pfeifsprache ist eine ethnologische Rarität.« *Kosmos 7, S. 298–299*

WARUM ES KEINE ANTIGALAXIEN GIBT

»Immer wieder hört man die Ansicht, es könnten Galaxien existieren, die aus Antimaterie bestehen. Ein Forscher am Institut für Raumfahrtstudien am Goddard Space Flight Center, New York, hat nun kürzlich Gründe aufgeführt, die gegen die Existenz sprechen. Er geht dabei von der Hypothese aus, daß das Weltall in seinem Anfangsstadium auf einem sehr kleinen Bereich konzentriert gewesen sei. Wären dort gleich viele Nukleonen und Antinukleonen vorhanden gewesen, so hätten sich diese gegenseitig fast vollzählig vernichten müssen. [Dabei] wären Pi-Mesonen entstanden, die in Gammaquanten zerfallen. Diese Strahlung [müsste] den Weltraum bis auf den heutigen Tag in hoher Intensität erfüllen.« *Kosmos 7, S. 226*

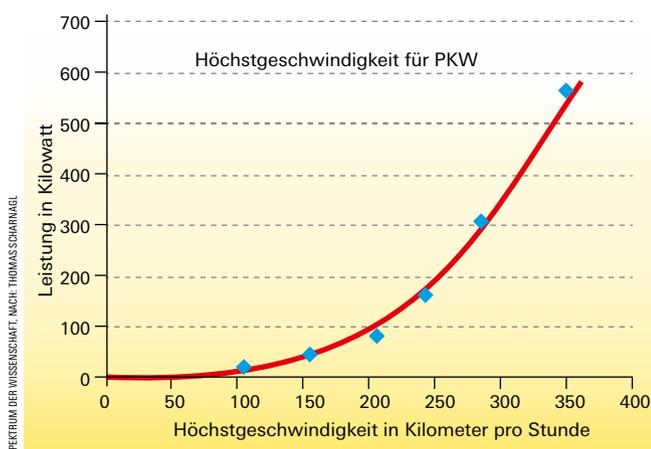
AUSGESTORBENER RIESE

»Im Herbst 1965 ist aus Süßwassermergeln, die etwa 3 Millionen Jahre alt sein dürften, ein Riesensalamanderskelett geborgen worden. Es gehört zur Art *Andrias scheuchzeri* und mißt mit 80 cm Gesamtlänge etwa zwei Drittel des Maximums dieser größten Amphibien der Erdneuzeit. In Ostasien lebt die gleiche Art noch heute. Warum gibt es keine mehr in Europa? Mit einigem Recht kann man jetzt die Klimaverschlechterung zu Beginn des Eiszeitalters dafür verantwortlich machen.« *Die Umschau 13, S. 422*

POTENZGESETZ TRIFFT AUTOS EBENSO

Radeln ist höchst effizient, doch selbst der sportlichste Fahrer muss sich irgendwann der Luftwiderstandskraft beugen. Denn sie steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit, erläuterte H. Joachim Schlichting (»Konkurrenzlos sparsam«, Spektrum April 2017, S. 74).

Thomas Scharnagl, Tiefenbach: Der Artikel von Herrn Schlichting über das Radfahren hat mir gut gefallen. Man sieht deutlich, dass ein immer höherer Aufwand nötig ist, um noch ein wenig schneller fahren zu können. Wenn die Luftwiderstandskraft proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist, geht die Leistung, also Kraft mal Geschwindigkeit, mit der Geschwindigkeit hoch drei. Das entspricht auch der auf S. 75 eingezeichneten Kurve, diese extreme Abhängigkeit wurde nur nicht explizit erwähnt. Dass man, um doppelt so schnell zu fahren, die achtfache Leistung



Nicht nur beim Fahrradfahren steigt der Luftwiderstand exponentiell. Auch bei verschiedenen Automodellen (in aufsteigender Reihenfolge: Tata Nano, Hyundai i10, BMW 316d, BMW 225d, Porsche Panamera, Lamborghini Roadster) verbindet ein Potenzgesetz die Motorleistung mit der Höchstgeschwindigkeit.

aufbringen muss, hört sich noch viel erschreckender an, als es im Diagramm aussieht.

Das Gleiche gilt natürlich für Autos. Deshalb habe ich eine Hand voll Modelle herausgesucht, die möglichst die ganze verfügbare Spannweite an Motorleistung abdecken, und ebenfalls einen Zusammenhang mit der Geschwindigkeit hoch drei (eingezeichnete Kurve) gefunden, obwohl sich die Autotypen deutlich in Gewicht, Querschnitt und c_w -Wert unterscheiden. Das gilt näherungsweise entsprechend für den Spritverbrauch, wie man an der Verbrauchsanzeige erahnen kann.

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.

ALTERNATIVE DEUTUNGEN

Die Archäologin Marion Benz berichtete von monumentalen Kultstätten, die Menschen vor mehr als 11 000 Jahren in Vorderasien errichteten (»Steinerne Symbole einer neuen Zeit«, Spektrum Mai 2017, S. 12).

Walter Weiss, Kassel: Die entdeckten Anlagen stehen im Gegensatz zu unserem Geschichtsbild der Zeit vor 11 000 Jahren. Entweder muss also dieses revidiert werden – oder die zeitliche Einordnung ist falsch.

Leider steht in dem Artikel nichts darüber, welche Fakten und Methoden der Datierung zu Grunde gelegt worden sind. Und solange das hier nicht näher aufgeklärt wird, sind die ausgegrabenen Relikte bei aller Monstrosität und Neuigkeit doch nicht so überwältigend. Auch die Schilderung der näheren Umgebung, wonach schon in dieser alten Zeit dort regelrechte Ortschaften mit bis zu 300 Bewohnern existiert haben sollen, ist zeitlich nicht fixiert.

Die Kalksteine selbst lassen sich kaum auf die Zeit ihrer Bearbeitung festlegen. Wenn zum Beispiel unter einem offensichtlich seit der Errichtung nicht bewegten Artefakt ein menschliches Skelett oder ein Holzstück gefunden worden sein sollte – beides ließe sich ja einigermaßen sicher zeitlich einordnen –, wäre ich schon ein wenig gläubiger.

Falls die Datierung stimmt, passen die Relikte absolut nicht in unser bisheriges Bild, laut dem die nicht besonders zahlreichen Menschen zu jener Zeit in sehr kleinen Gruppen umherzogen und vom Fischfang, Sammeln und der Jagd lebten. Die Gruppen begegneten sich äußerst selten. Gemeinsame Interessen dürften die Ausnahme gewesen sein.

Das Bild ist aus derart vielen Fakten zusammengesetzt, dass ich keinen Raum für eine Revision der Geschichte sehen kann. Mithin ist, wenigstens für mich, die Frage der Datierung offen. Ich vermute, dass insoweit Fehler gemacht worden sind.

Harald Immel, Maisach-Gernlinden: Voreingenommenheit ist weit verbreitet, auch bei Wissenschaftlern. Bei Archäologen macht sich das häufig dadurch bemerkbar, dass bei einem überraschenden beziehungsweise spektakulären Fund fast automatisch an einen Kult gedacht wird. Schon der erste Ausgräber von Göbekli Tepe, Klaus Schmidt, hat die Bauten als Tempel bezeichnet, und Marion Benz spricht von Kultstätte und Bergheiligtum.

Andererseits hat schon Edward Banning 2011 darauf hingewiesen, dass hier viel eher Wohnbauten vorliegen.

Was sollen auch mehrere engstbenachbarte Kultstätten, die jeweils nur Platz für eine äußerst beschränkte Anzahl von Personen bieten?

Und die Tierfiguren müssen nicht unbedingt mit schamanistischen Praktiken zu tun haben. Folgt man Ina Wunn und ihren Mitautoren (»Götter, Gene, Genesis«, 2015), könnten sie auch schlicht eine Unheil abweisende Funktion haben, was ja gelegentliche kultische Handlungen der Bewohner nicht ausschließt.

Ob diese Interpretationen richtig sind, sei dahingestellt, aber in einem ernst zu nehmenden wissenschaftlichen Artikel sollte eine alternative Deutung der Befunde zumindest erwähnt werden.

Eckart Lefringhausen, Geldern: Im Aufsatz von Frau Benz wird den T-Pfeilern von Göbekli Tepe ein menschliches Aussehen bescheinigt. Es ist aber auch eine andere Auslegung möglich. Als ich vor wenigen Jahren die Grabungsstätte besichtigte, war mein unmittelbarer Eindruck, dass es sich um auf die »Mutter Erde« hin orientierte Phalli handelt. Für diese Deutung spricht einiges.

So zeigen die auf den Pfeilern abgebildeten Tiere häufig männliche Geschlechtsmerkmale, was für diese frühe Zeit nach meinem Wissen einmalig ist. Zum anderen weist Frau Benz mit Recht auf die zeitliche Nähe zur Erfindung von Ackerbau und Viehzucht hin. Diese Neuerungen wären aber ohne Kenntnis des männlichen Beitrags zur Zeugung unmöglich gewesen, da der weibliche Beitrag – die Eizelle – bis ins 17. Jahrhundert hinein unbekannt war und damals auf eine passive Rolle der Frau beschränkt wurde.

Antwort von Marion Benz:

Diese Relikte würden nicht in unser bisheriges Geschichtsbild passen, zweifelt Walter Weiss und schließt auf eine falsche Datierung. Selbst Wissenschaftler konnten das hohe Alter der monumentalen Kultanlagen am Göbekli Tepe anfangs kaum glauben. Was damals noch als Sensation galt, wurde mittlerweile durch mehr als 20 Fundstellen aus dem 10. Jahrtausend v. Chr. bestätigt. So unvorstellbar das hohe Alter wirkt, es ist durch Hunderte von Radiokarbonaten belegt (www.exorient.org/associated_projects/ppnd.php listet alle Fundstellen mit ihren absoluten Datierungen auf).

Wir müssen also tatsächlich unsere Geschichtsbücher umschreiben. Während man in Europa noch in der tiefsten Steinzeit lebte, begann in Vorderasien bereits im 13. Jahrtausend v. Chr. ein Prozess, der das Zusammenleben für immer verändern würde. Erstmals ließen sich Jäger und Sammler in festen Siedlungen nieder und produzierten ihre Nahrung selbst, statt in kleinen Gruppen umherzuziehen. Damit nicht genug, errichteten sie mit erstaunlichem

Aufwand und Organisationstalent gigantische Kultstätten. Nur Edward Banning hielt die Anlage auf dem Göbekli Tepe für Wohngebäude. Er konnte diese These aber nicht beweisen, und sie gilt inzwischen als widerlegt. Denn die Forschungen der letzten Jahre zeigen, dass die Menschen damals an Euphrat und Tigris in einfachen Rundhütten oder Langhäusern wohnten, die in keiner Weise den imposanten Sondergebäuden vom Göbekli Tepe, Nevalı Çori oder Jerf el Ahmar gleichen. Freilich darf man diskutieren, wozu diese dienten.

Zweifelsfrei ist, dass die Pfeiler vom Göbekli Tepe anthropogene Wesen darstellen sollten: Sie haben Arme und Hände, die sie angewinkelt über dem Bauch anlegen, sie tragen Schärpen, Gürtel und manche von ihnen sogar einen Lendenschurz. Die Auswahl sowie die Art und Weise, wie Tiere und Menschen abgebildet werden, deuten auf schamanistische Rituale. Doch das ist sicher nicht die einzige Möglichkeit. Rätselhaft bleibt, was Eckart Lefringhausen auffiel: dass viele Tiere und Männer mit ihren Geschlechtsmerkmalen in

sichtlich erregtem Zustand gezeigt werden. Waren dies Unheil abwehrende Gesten – wie Harald Immel vorschlägt? Allerdings zwingen die neuen Erkenntnisse der Archäologie auch hier zur Vorsicht, denn als Gegenpart zu solchen männlichen Symbolen sah man lange die Skulpturen und Zeichnungen von »fat ladies«. Doch die Deutung dieser Darstellungen als Muttergöttinnen des frühen Neolithikums steht mittlerweile stark im Zweifel.

SPALTUNG STOPPEN – ABER WIE?

Die Einkommensunterschiede in den Industrienationen wachsen und mit ihnen die sozialen Spannungen. Das gefährdet unsere Demokratie, mahnte Nobelpreisträger Angus Deaton (»Gespaltene Gesellschaft«, Spektrum Mai 2017, S. 78).

Christian Monnerjahn, Magdeburg: Leider bleibt der Artikel sehr im Allgemeinen. Er zeigt nicht auf, wen denn die Spaltung in »reich« und »arm« wie trifft – das mag ja je nach System sehr verschieden sein und bestimmt auch die Optionen, diese Spaltung zumindest so weit zu kontrollieren, dass ein gesellschaftlicher Grundkonsens bestehen bleibt.

Infolge dieses Mangels können die Lösungsvorschläge nicht überzeugen. Die Aussage »Soziale Vereinbarungen lassen sich ändern« ist zwar richtig, das allein macht aber keine Hoffnung auf eine allgemein verträgliche und positive Lösung. Jede radikale Bewegung, der so genannte Islamische Staat eingeschlossen, verspricht ja genau das: das gesellschaftliche System zu verändern.



futur III

Sicherheitshinweise für menschliche Läufer

Mit ein wenig Vorsicht ist Freizeitsport ungefährlich. **Eine Kurzgeschichte von Marissa Lingen**

Unmittelbar nach der Ankunft der Vitclemps konnten viele Menschen wegen des sozialen Aufruhrs nicht ihren gewohnten Ausgleichssport treiben. Doch seit der Errichtung des glorreichen Vitclemp-Protectorats beginnt sich das menschliche Leben zu normalisieren. Hier folgen einige Tipps, wie Sie ohne Schaden wieder Ihre menschliche Laufroutine aufnehmen können:

1. Ihr Schweiß darf niemals die Luft berühren. Natürlich kennen fast alle Vitclemps den Unterschied zwischen Menschen und anderen Säugetieren, wobei laut Vertrag nur Letztere den Vitclemps als rechtmäßige Beute dienen. Verhalten Sie sich dennoch verantwortungsvoll! Reizen Sie sie nicht mit Ihren nach Säugetier riechenden Körpersäften! Die Hersteller von Joggingsschuhen bieten nun auch schweißsaugende Ganzkörperhüllen an, die Ihnen ein sicheres Laufvergnügen ermöglichen.

Wählen Sie unbedingt eine Kopfbedeckung, die Nase und Stirn vollständig abdeckt. Sorglose Läufer vergessen gern, dass dieser Gesichtsbereich kühlende Säugetierdünste abgibt.

2. Laufen Sie niemals am Wasser entlang. Obwohl die allermeisten unserer Vitclemp-Beschützer selbstverständlich Menschen von anderen Beutetieren unterscheiden können, fällt es den jüngsten Vitclemps besonders schwer, ihre natürlichen Triebe zu zügeln. Sie verbringen bekanntlich die meiste Zeit unter Wasser, denn gerade der Wasserreichtum macht unseren Planeten zu ihrem idealen Aufenthaltsort. Wenn Sie einen jungen

Vitclemp aus dem Schlaf schrecken, gewinnt der Instinkt die Oberhand über seine Erziehung. Halten Sie sich sicherheitshalber von jeder Art Wasser fern – von Seen, Teichen, Bächen, Flüssen, Meeren und Sümpfen.

3. Perfektionieren Sie Ihren Laufstil.

Mit schlampigem Schlurfen oder extremem Fersenlauf können Sie sich die Füße ruinieren, und Orthopäden sind selten geworden, da Vitclemps kein mit menschlichen Beinen vergleichbares Organ besitzen. Laufen Sie richtig, um Ihre Füße zu schonen.

4. Melden Sie Ihren Laufplan an.

Wenn Sie dem Zentralkommandeur Ihrer örtlichen Protectorat-Station sowie einem Freund oder Familienmitglied zuvor Bescheid geben, steigt die Chance, dass jemand Ihr Verschwinden bemerkt, bevor ein Vitclemp Sie irrtümlich komplett verschlingt. Selbst wenn Sie verschlungen werden, bekommen das Protectorat und Ihre Lieben die Möglichkeit, Ihre nichtorganischen Besitztümer aufzuspüren und als Andenken zu sichern, die vielen Menschen in Zeiten der Trauer Trost spenden.

5. Nehmen Sie Pfefferspray mit.

Pfeffer ist ein abstoßendes menschliches Gewürz. Falls ein Vitclemp unglücklicherweise die Spezies verwechselt, sprühen Sie sich einfach mit Pfefferspray ein. Zielen Sie auf Kopf und Rumpf; bereits verschlungene Gliedmaßen sind wahrscheinlich nicht zu retten, aber für Beine gibt es Prothesen, für Köpfe (noch) nicht!

Da Pfefferpflanzen heute viel seltener angebaut werden als vor der

Ära des Protectorats, könnte der teure Pfefferspray Ihr geringes menschliches Budget übersteigen. Mixen Sie dann stattdessen ein hausgemachtes Spray aus Gewürzmischung, Wasser und Ume-Essig. Zwar wirkt diese Mischung nicht annähernd so abstoßend wie Pfeffer, doch erschreckt der stechend scharfe Geschmack den Vitclemp vielleicht derart, dass er wenigstens einen Teil des Menschen herauswürgt und überlegt, welche Spezies er da verschlingt.

6. Bleiben Sie in der Nähe von Siedlungen.

Es mag paradox anmuten, aber zahlreiche Vitclemps bedeuten für einen menschlichen Läufer weniger Risiko. Wird ein Mensch mit einem Beutetier verwechselt und angefallen, so kann er die anderen Vitclemps bitten, ihren momentan verwirrten Artgenossen zur Rede zu stellen, zu ermahnen oder sogar aufzuhalten. Der große Vorteil besteht darin, dass sie dies in Bereichen des emotionalen und akustischen Spektrums tun können, die für menschliche Stimmen einfach unzugänglich sind. Eine Laufstrecke, die direkt um die örtliche Protectorat-Station und die Kaserne herumführt, ist daher wahrscheinlich die allersicherste Wahl.

Selbst wenn das nichts bringt, haben siedlungsnahe Strecken noch einen anderen Vorteil. So können dann andere Menschen zumindest Zeugen des Vorgangs werden, Verwandten und Bekannten vom Ableben ihres Mitmenschen berichten und, wie oben erwähnt, nichtorganische Besitztümer aufsammeln.

Auf keinen Fall dürfen Menschen Wälder, Wiesen oder andere natürli-

che Umgebungen zum Laufen nutzen. Diese Ökotope wimmeln von Beutetieren, und es wäre unverantwortlich, die Vitclemps auf diese Weise zu verwirren. Menschen, welche die natürliche Schönheit unseres gemeinsam bewohnten Planeten genießen möchten, sollten sich für Rundfahrten in versiegelten geländegängigen Fahrzeugen anmelden.

7. Tragen Sie reflektierende Kleidung. Nur sehr wenige genießbare Beutetiere haben glänzend spiegelnde Hautflecken, insbesondere keine, die auf der Erde leben. Allerdings beobachten Forscher neuerdings die Evolution von auffälligen Fellmustern bei *Alces alces*, dem Elch.

8. Beachten Sie den Vorrang im Straßenverkehr. Wie jeder Mensch weiß, genießen die Vitclemps auf allen Wegen Vorrang, aber nicht jedem ist bewusst, dass das Gleiche auch für autonome Fahrzeuge gilt. Es ist angebracht, in den Straßengraben zu hechten, um die Strecke für vorrangige Verkehrsteilnehmer frei zu machen – doch wiederum gilt: Stellen Sie vorher sicher, dass der Graben kein Wasser führt.

Im Prinzip sollte diese Verhaltensregel den Menschen vertraut sein, denn schon vor der Ankunft der Vitclemps hatten Automobile Vorrang vor Fußgängern und muskelgetriebenen Vehikeln.

Fazit: Auch in der glorreichen Ära unseres Protektorats können die Menschen ihrem geliebten Freizeitsport nachgehen und sich nach Herzenslust austoben! Verhalten Sie sich vernünftig und nehmen Sie Rücksicht auf unsere neuen Freunde, dann macht das Laufen Spaß, und Sie kommen sicher heim.

DIE AUTORIN

Marissa Lingen hat mehr als 100 Kurzgeschichten in Sciencefiction-Magazinen wie »Lightspeed«, »Analog« und auf Tor.com publiziert.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 544, S. 186, 20. April 2017

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

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

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

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

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

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

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

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

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

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

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

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

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

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

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 38 vom 1.1. 2017.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der 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: © 2017 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



VORSCHAU



WAS IST WAHRHEIT?

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

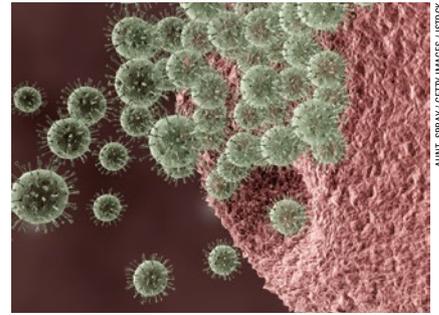
Wissenschaftliche Theorien beschreiben die Welt, wie sie ist, oder kommen diesem Ziel zumindest recht nahe. Man kann die entsprechende philosophische Position, den »Realismus«, nicht beweisen, aber gute Gründe dafür anführen. Insbesondere lässt der Realismus keinen Raum für Willkür: Niemand kann beispielsweise Realist sein in Bezug auf die physikalischen Prozesse der Kernspaltung und zugleich einer Verschwörungstheorie anhängen, was die Folgen des Klimawandels betrifft.



LUTHER VON CAJERAN, HOLZSCHNITT UM 1557 / PUBLIC DOMAIN

LUTHER UND DER VATIKAN

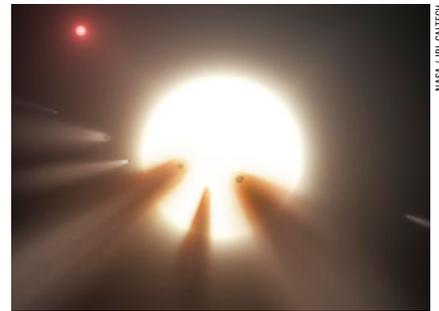
Zu Anfang war es nur ein Streit unter Theologen. Doch Martin Luthers Thesen bargen einen Sprengstoff, der die Kirche innerhalb weniger Jahre dauerhaft spaltete. Eine neue Sichtweise auf die Schriftquellen der Kirche macht diese Dynamik verständlich.



AUNT_SPRAY / GETTY IMAGES / ISTOCK

NEUE SERIE: DIE WAHRE NATUR DER VIREN

Viren spielen eine Schlüsselrolle bei Entstehung und Evolution des Lebens. Für Forscher werfen sie grundsätzliche Fragen auf: Was ist überhaupt Leben? Und welche ökologischen Funktionen haben diese parasitären Molekülkomplexe?



NASA / JPL-CALTECH

TABBYS STERN – EIN KURIOSSES OBJEKT

Die Helligkeit des Sterns KIC 8462852 schwankt stark und unregelmäßig. Unter allen bekannten Sternen ist das Phänomen einmalig, und bisher gibt es keine überzeugende Erklärung dafür. Das nährt viele Spekulationen.

NEWSLETTER

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

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

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

Wunschgeschenk:

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

Keine Mindestlaufzeit:

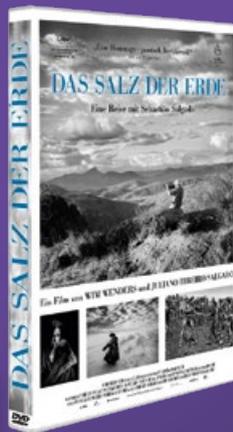
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:

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

DVD »Das Salz der Erde«

In den vergangenen 40 Jahren hat der brasilianische Fotograf Sebastião Salgado auf allen Kontinenten die Spuren unserer sich wandelnden Welt und Menschheitsgeschichte dokumentiert.
Spielzeit 106 Minuten



**Wählen
Sie Ihr
Geschenk**



Buch »Die verborgene Wirklichkeit«

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

Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

www.spektrum.de/abo



Sie möchten Lehrstühle oder Gremien besetzen? Sie suchen weibliche Experten, Gutachter oder Redner zum Thema?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer Datenbank mit über 2.300 Profilen herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature