

Spektrum

der Wissenschaft

Der Code des Universums

Wie schön sind die Naturgesetze?

+ die 40 besten Artikel aus vier Jahrzehnten

40 Jahre

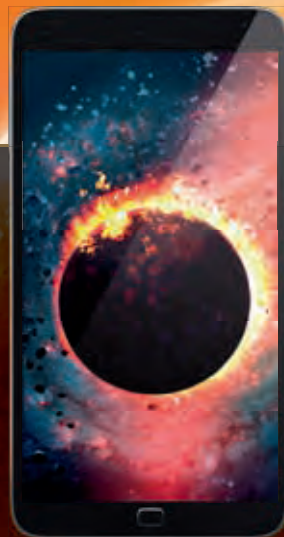
OZEANE Todeszonen durch Sauerstoffmangel

TELOMERASE Nobelpreisträgerin Elizabeth Blackburn über die biologische Alterung

MUMIEN Erstaunliche Funde in deutschen Kirchengrüften

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)



GREMINI / GETTY IMAGES / ISTOCK





EDITORIAL 40 JAHRE SPEKTRUM

Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

»Dieses Weihnachten jährt es sich zum 40. Mal, dass ich Ihre großartige Zeitung lese – das Abo war ein Geschenk meiner Eltern. Nun ächzt mein Speicher unter 40 Jahrgängen, und ich freue mich immer noch jeden Monat auf die neueste Ausgabe mit vielen spannenden Themen.« Diese Zeilen schrieb uns vor Kurzem ein Abonnent der ersten Stunde, Prof. Dr. Arnulf Deinzer. Vor 40 Jahren, im November 1978, kam die Premierenausgabe von »Spektrum der Wissenschaft« heraus. Bis heute ist der Anspruch des Magazins derselbe geblieben: in der Tradition des »Scientific American« neugierige Leserinnen und Leser mit den wichtigsten Entwicklungen der Wissenschaft vertraut zu machen, im Idealfall aufgeschrieben von den führenden Forscherinnen und Forschern selbst.

Das Jubiläum haben wir zum Anlass genommen, einmal das eigene Archiv zu durchstöbern: Welches waren unsere besten Artikel? Wo gelang es uns, Autoren zu gewinnen, die ihre auch aus heutiger Sicht bahnbrechenden Erkenntnisse anschaulich beschrieben? Anhand solcher Kriterien kürten wir 40 »Artikel des Jahres«; die Liste finden Sie direkt hinter dem Inhaltsverzeichnis auf S. 6/7. Alle 40 Beiträge haben wir zudem neu aufbereitet auf Spektrum.de publiziert, so dass Sie sie selbst dann nochmals studieren können, wenn Sie ältere Hefte selbst nicht zur Hand haben.

Des Weiteren haben wir mit einigen der renommiertesten unserer Autoren aus den letzten Jahrzehnten das Gespräch gesucht, darunter fünf Nobelpreisträger. Wir fragten sie, wie sich ihr Forschungsgebiet weiterentwickelt hat – und welche großen Fragen die Zukunft prägen dürften. Die entstandenen Dialoge präsentieren wir nun als sechsteilige Interviewreihe. Den Beginn macht die Molekularbiologin Elizabeth Blackburn, die bereits 1996 bei uns über ihre richtunggebenden Forschungen zur Alterung von Zellen berichtete, Arbeiten, für die sie 2009 mit dem Nobelpreis für Physiologie oder Medizin ausgezeichnet wurde.

Spektrum hat eine Mission. Schau ich nach vorn, so denke ich, dass diese immer wichtiger wird. Es gibt mehr Forschung denn je. Was aber ist bei kritischer Betrachtung wirklich neu, ja wegweisend? Und wo wird Wissenschaft ihrer Verantwortung gerecht, dem Wohl von Menschen, Erde und Umwelt zu dienen? Dies frühzeitig zu identifizieren und unseren Leserinnen und Lesern verständlich zu erklären, um möglichst viele Menschen daran teilhaben zu lassen, das ist eine schöne Aufgabe. Oder, wie Arnulf Deinzer seinen Leserbrief schloss: »Ich freue mich auf die nächsten zig Jahrgänge.« Wir auch!

Herzlich grüßt
Ihr



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum SPEZIAL Archäologie – Geschichte – Kultur 3.18** beschäftigt sich mit Mumien: vom alten Ägypten bis Ötzi.

IN DIESER AUSGABE



ELIZABETH BLACKBURN

Im Gespräch mit »Spektrum« schildert die Nobelpreisträgerin, inwiefern die Schutzkappen der Chromosomen für unsere Gesundheit wichtig sind (S. 52).



CLARISSA KARTHÄUSER, ANDREAS OSCHLIES UND CHRISTIANE SCHELLEN

Die Ozeanologen erforschen lebensfeindliche sauerstoffarme Zonen in tropischen und subtropischen Meeren (S. 58).



AMELIE ALTERAUGE

So manche deutsche Kirchenruft birgt gut erhaltene Mumien. Die Archäologin und Anthropologin untersucht, ob dahinter Zufall oder Absicht steckt (S. 82).

3 EDITORIAL

6 UNSERE BESTEN 40 ARTIKEL AUS VIER JAHRZEHNTE

8 SPEKTROGRAMM

Leuchtender Geisterfisch

Tsunami im Taan-Fjord

Geschlechtsunterschiede bei
Immunzellen

Der wahre Kern der
»Odyssee«

Rote Nova fällt aus

Graphen aus der Mikrowelle

Vegetarische Haie

Steinzeithirten veränderten
die Savanne

34 FORSCHUNG AKTUELL

Gletscherschmelze hebt die Antarktis

Die schwindende Eislast
setzt den Untergrund in
Bewegung – nach oben.

Die Ahnen der Przewalski- Pferde

Die vermeintlich letzten
Wildpferde stammen
in Wirklichkeit von domes-
tizierten Tieren ab.

Optimierter Taxiverkehr

Mit Hilfe der Graphentheorie
ließe sich die Taxiauslastung
in New York dramatisch
verbessern.

43 SPRINGERS EINWÜRFE

Empfindsames Werkzeug

Ein Stab in der Hand
erweitert unseren Tastsinn.

67 FREISTETTERS FORMELWELT

Pi und die Experimental- mathematik

Eigentlich hat Mathematik
nichts mit realen Gegen-
ständen am Hut. Aber
manchmal eben doch ...

14 TEILCHENPHYSIK **TRÜGERISCHE ELEGANZ**

Physiker streiten darüber, warum sie bei der Suche nach einer »Theorie von allem« nicht weiterkommen. Haben sie sich in den vergangenen Jahrzehnten von mathematischer Ästhetik in die Irre führen lassen?

Von Robert Gast

24 NATURGESETZE **AM ENDE DER NATÜRLICHKEIT**

Ein zentrales Element des Standardmodells der Elementarteilchen wirkt wie die Folge eines extrem unwahrscheinlichen Zufalls. Lange hielten Forscher das für eine Fährte zu neuen Naturgesetzen – nun hat sich die Lage geändert.

Von Robert Gast

44 ÖKOLOGIE **ENTFESSELTE ERREGER**

Veränderte klimatische Bedingungen beschleunigen die Ausbreitung bestimmter Krankheiten und erschweren es erheblich, Epidemien vorherzusehen.

Von Lois Parshley

52 INTERVIEW **»TELOMERE SIND KEINE KRISTALLKUGELN«**

Serie: Große Forscher im Gespräch (Teil 1) Wie wirkt sich der Telomerase-Mechanismus auf unsere Gesundheit und Lebenserwartung aus? Nobelpreisträgerin Elizabeth Blackburn gibt Antworten.

Von Michaela Maya-Mrschtik und Frank Schubert

58 MEERESKUNDE **DEM OZEAN GEHT DIE LUFT AUS**

Riesige lebensfeindliche Regionen in tropischen und subtropischen Meeren dehnen sich wegen Stickstoffbelastung und Klimaveränderung weiter aus.

Von Clarissa Karthäuser, Andreas Oschlies und Christiane Schelten

68 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **DIE BUNTE WELT DER AZOFARBSTOFFE**

Azoverbindungen verleihen Lebensmitteln, Kleidung und vielen anderen Produkten intensive Farben. Aber sie bergen auch gesundheitliche Risiken.

Von Matthias Ducci und Marcus Oetken

72 INFORMATIK **SPIELEND LERNEN**

Computerprogramme sind Menschen in vielen Brettspielen schon seit Jahren überlegen. Werden neue Versionen der künstlichen Intelligenz künftig auch komplexe Aufgaben wie Operationen autonom durchführen?

Von Joshua Sokol

77 INTERVIEW **DIE ZUKUNFT DER KI**

Für den Informatiker Judea Pearl steckt die künstliche Intelligenz in einer Sackgasse. Um sich daraus zu befreien, will er den Systemen beibringen, nach dem Warum zu fragen.

Von Kevin Hartnett

82 KIRCHENMUMIEN **UNVERSEHRT BIS ZUM JÜNGSTEN GERICHT**

Serie: Mumien (Teil 3) Versprach eine Gruft den Zerfall zu verhindern, ließen sich Adlige und geistliche Würdenträger gern darin zur letzten Ruhe betten.

Von Amelie Alterauge



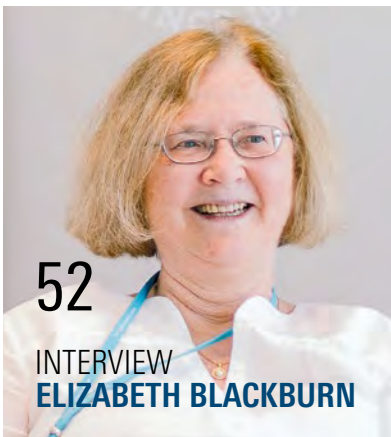
14

TITELTHEMA
DIE SCHÖNHEIT DER
NATURGESETZE



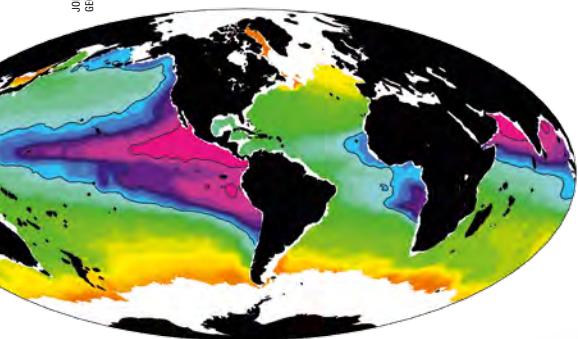
44

ÖKOLOGIE
ENTFESSELTE ERREGER



52

INTERVIEW
ELIZABETH BLACKBURN



58

MEERESKUNDE
DEM OZEAN GEHT DIE LUFT AUS

72

INFORMATIK
SPIELEND LERNEN



80 SCHLICHTING!

Schmelzende Eisberge

Der Meeresspiegel steigt,
wenn schwimmendes Eis
auftaut.

86 ZEITREISE

Vom Traktorpanzer
zum Speicherkristall

88 REZENSIONEN

Michael Eckert, Jürgen

Teichmann: Physik

Joachim Whaley,

Johann Chapoutot:

Unsere Geschichte

Christian Hesse: Leben?

Norbert Sachser:

Der Mensch im Tier

Lars Bluma, Michael Far-

renkopf, Stefan Przigoda:

Geschichte des Bergbaus

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

Hart an der Grenze

Unterwegs mit Danny
Whiskers.

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

Titelbild:
sakkmasterke / Getty Images / iStock



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

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

DIE BESTEN 40 ARTIKEL AUS VIER JAHRZEHTEN

Anlässlich des runden Jubiläums haben wir unser Archiv gesichtet und für jeden Jahrgang den besten Artikel gekürt. Die Texte präsentierten aus heutiger Sicht besonders bahnbrechende Erkenntnisse, von denen viele ganze Forschungsgebiete revolutionierten – wahre Meilensteine der Wissenschaft.

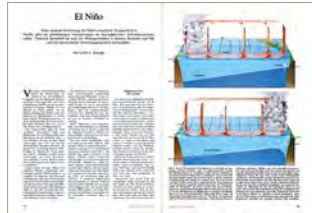


VOM URSPRUNG DER SCHRIFT

12.78, S. 4

KREBSGENE

5.82, S. 44



EL NIÑO

8.86, S. 92



DIE QUANTENPHYSIK DER ZEITREISE

11.94, S. 50

EINE NACHTFAHRT UND DIE POLYMERASE-KETTENREAKTION

6.90, S. 60



DIE VERARBEITUNG VISUELLER INFORMATIONEN

11.79, S. 106



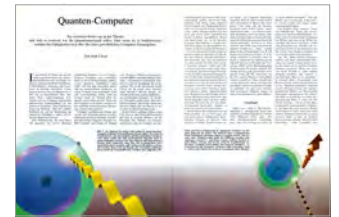
OSZILLIERENDE CHEMISCHE REAKTIONEN

5.83, S. 98



FULLERENE

12.91, S. 88



QUANTEN-COMPUTER

12.95, S. 62

DAS HIGGS-BOSON

1.87, S. 52

1978 1979 1980 1981 1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997

LEGIERUNGEN, DIE SICH AN FORMEN ERINNERN

1.80, S. 48

PRIONEN

12.84, S. 48



WIE DER LEOPARD ZU SEINEN FLECKEN KOMMT

5.88, S. 88



MOLEKULARE GRUNDLAGEN DES LERNENS

11.92, S. 66



GRADIENTEN ALS ORGANISATOREN DER EMBRYONAL-ENTWICKLUNG

10.96, S. 38



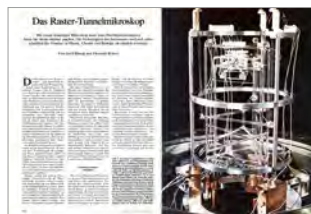
TAUCHEXPEDITION ZUR OSTPAZIFISCHEN SCHWELLE

7.81, S. 72



DAS RASTER-TUNNEL-MIKROSKOP

10.85, S. 62



FRAKTALE – EINE NEUE SPRACHE FÜR KOMPLEXE STRUKTUREN

9.89, S. 52



ULTRAGENAU ZEITMESSUNG

9.93, S. 32



WIE UND WARUM BAKTERIEN KOMMUNIZIEREN

4.97, S. 78



KLONEN FÜR MEDIZINISCHE ZWECKE
4.99, S. 34



HUBBLES TOP 10
9.06, S. 36



MANDELBROT DREIDIMENSIONAL
4.10, S. 56



PHYSIKALISCHE TARNKAPPEN
1.14, S. 80



DIE BOSE-EINSTEIN-KONDENSATION
5.98, S. 44



WIE MADEN MÖRDER ENTLARVEN
3.02, S. 42



WIE GENIES DENKEN
1.07, S. 36



KANN DIE ZEIT ENDEN?
5.11, S. 36



GEZIELTER EINGRIFF INS ERBGUT
9.15, S. 22

EIN UNIVERSUM VOLL DUNKLER RÄTSEL
12.03, S. 28

1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017

QUANTEN-TELEPORTATION
6.00, S. 30



KÜNSTLICHE NETZHAUT FÜR MENSCH UND ROBOTER
10.05, S. 90



WUNDERSTOFF AUS DEM BLEISTIFT
8.08, S. 86



EIN NEUER WEG ZU LÄNGEREM LEBEN
7.12, S. 22



DAS GPS IM GEHIRN
10.16, S. 12



KLIMAWANDEL AUF DER ERDE – DIE PLANETARE KRANKHEIT
7.04, S. 32



DIE NEUROBIOLOGIE DES VERTRAUENS
4.09, S. 40



SÜCHTIG NACH ESSEN
11.13, S. 30



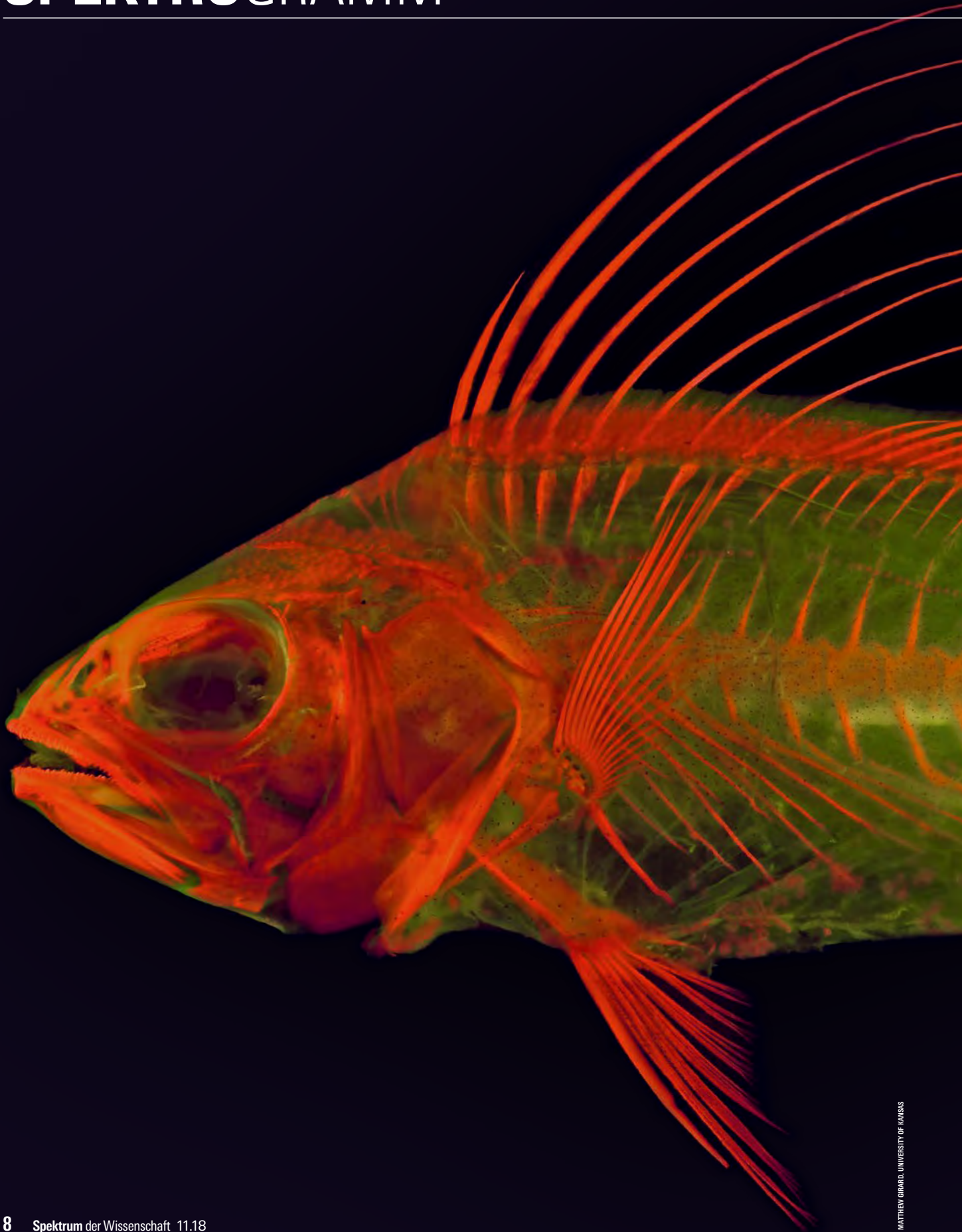
VERSCHRÄNKTE SCHWARZE LÖCHER
2.17, S. 12

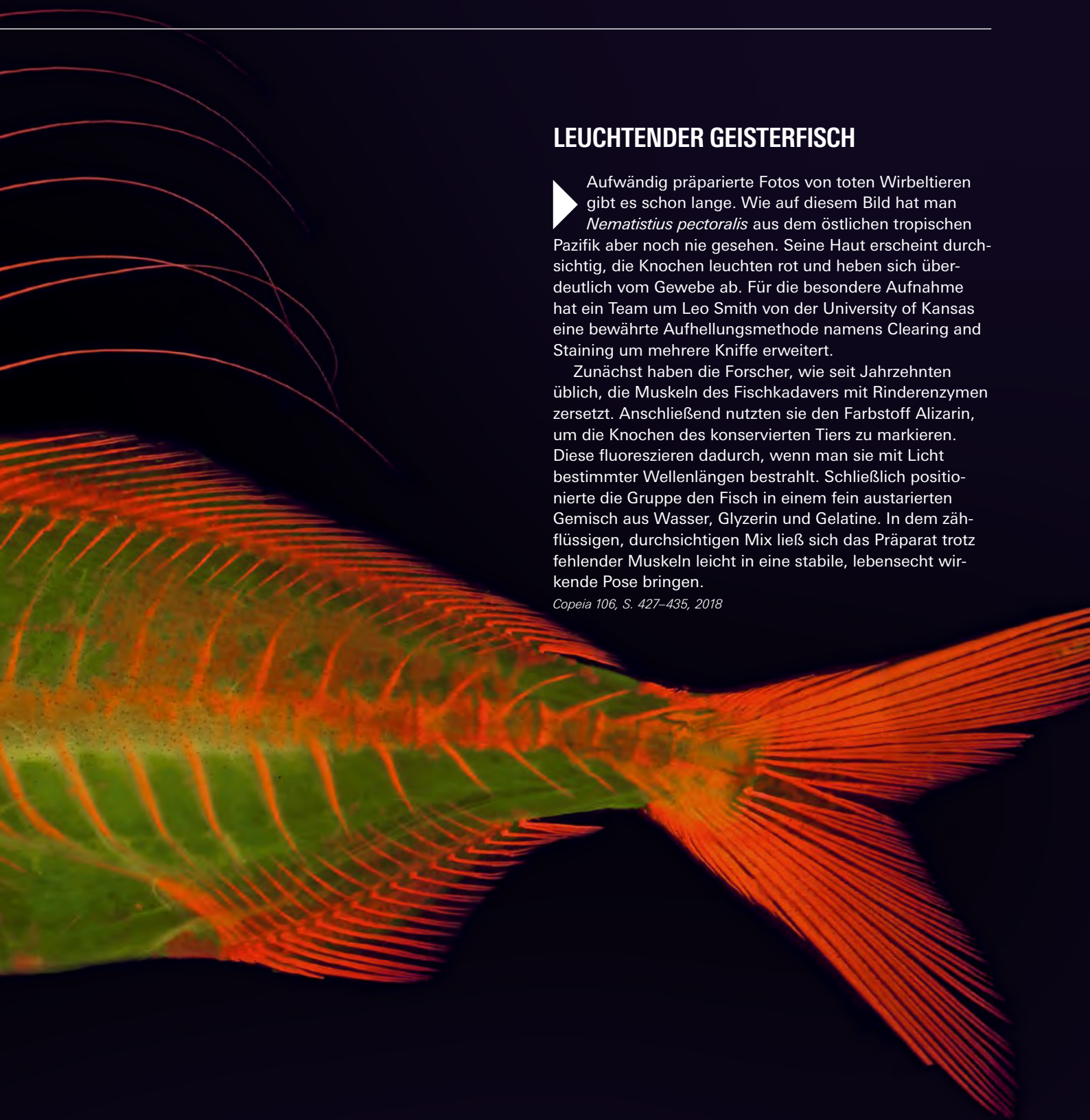


DAS GEHEIMNIS DER MUMIEN
8.01, S. 34



SPEKTROGRAMM





LEUCHTENDER GEISTERFISCH

► Aufwändig präparierte Fotos von toten Wirbeltieren gibt es schon lange. Wie auf diesem Bild hat man *Nematistius pectoralis* aus dem östlichen tropischen Pazifik aber noch nie gesehen. Seine Haut erscheint durchsichtig, die Knochen leuchten rot und heben sich überdeutlich vom Gewebe ab. Für die besondere Aufnahme hat ein Team um Leo Smith von der University of Kansas eine bewährte Aufhellungsmethode namens Clearing and Staining um mehrere Kniffe erweitert.

Zunächst haben die Forscher, wie seit Jahrzehnten üblich, die Muskeln des Fischkadavers mit Rinderenzymen zersetzt. Anschließend nutzten sie den Farbstoff Alizarin, um die Knochen des konservierten Tiers zu markieren. Diese fluoreszieren dadurch, wenn man sie mit Licht bestimmter Wellenlängen bestrahlt. Schließlich positionierte die Gruppe den Fisch in einem fein austarierten Gemisch aus Wasser, Glycerin und Gelatine. In dem zähflüssigen, durchsichtigen Mix ließ sich das Präparat trotz fehlender Muskeln leicht in eine stabile, lebensechte wirkende Pose bringen.

Copeia 106, S. 427–435, 2018



NATIONAL PARK SERVICE, ALASKA, REGION; FOTO: NPS / JACOB W. FRANK (WWW.FICR.COM/PHOTOS/ALASKA/NPS2092323031); PUBLIC DOMAIN

GEOWISSENSCHAFT TSUNAMI IM TAAN-FJORD

Am 17. Oktober 2015 kamen 180 Millionen Tonnen Fels plötzlich ins Rutschen. Direkt neben dem Tyndall-Gletscher stürzten sie in die Tiefe und verdrängten abrupt das Wasser im Tal, wodurch sich eine gewaltige Flutwelle bildete. Am gegenüberliegenden Hang schlug sie 193 Meter empor. Und selbst am 17 Kilometer entfernten Ausgang des Fjords erreichte sie noch eine Höhe von 15 Metern. Erst auf dem offenen Nordpazifik verlor der Tsunami seinen Schrecken.

Zum Glück ereignete er sich in der Wildnis Alaskas, weshalb niemand zu Schaden kam. Ein Team um Dan Shugar von der University of Washington Tacoma hat die Spuren der Flutwelle nun detailliert ausgewertet. Laut der Analyse handelte es sich um den viertgrößten bekannten Tsunami der vergangenen 100 Jahre. Und das Ereignis lässt sich demnach direkt auf die globale Erwärmung zurückführen: Der Tyndall-Gletscher hat sich seit 1961 um 17 Kilometer zurückgezogen und so das Tal erst freigegeben.

Links des Tyndall-Gletschers in Alaska rutschte 2015 ein Teil des Talhangs in den Fjord und löste einen gewaltigen Tsunami aus.

Seit 1991 verharrt die Eiszunge auf ihrer heutigen Position, doch den Talhängen fehlt seitdem die Stütze durch den Gletscher. Dadurch konnte am 17. Oktober 2015 die Wand direkt neben dem Gletscher in die Tiefe sacken.

Möglicherweise habe ein 500 Kilometer entferntes Erdbeben die Felsmassen losgetreten, schreiben die Forscher. Vermutlich war der Hang aber bereits in den Jahren zuvor in Bewegung geraten; darauf deuten jedenfalls Satellitendaten hin.

Tsunamis kommen in Alaska immer wieder vor. Am berühmtesten ist wohl das Ereignis von 1958 in der Lituya Bay, wo das Wasser sogar 550 Meter weit die Hänge hochraste. Drei Fischerboote waren damals vor Ort, von denen wie durch ein Wunder nur eines versank. Für die Zukunft fürchten Shugar und sein Team noch mehr derartige Naturkatastrophen. Denn je stärker sich die Gletscher zurückziehen, desto mehr Täler verlieren ihre eisige Stütze.

Sci. Rep.-Uk. 8, 12993, 2018

PHYSIOLOGIE GESCHLECHTSUNTERSCHIEDE BEI IMMUNZELLEN

► Auch bei Immunzellen kommt es offenbar auf das Geschlecht an: Wie Wissenschaftler um Susanne Wolf vom Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in Berlin beobachtet haben, weisen zumindest bei Mäusen die Mikrogliazellen unterschiedliche Eigenschaften auf – je nachdem, ob sie von männlichen oder von weiblichen Tieren stammen. Mikroglia gelten als Müllabfuhr des Zentralnervensystems: Sie entfernen Abfallstoffe und Zellreste im Gehirn, bekämpfen aber auch Krankheitserreger und rufen weitere Immunzellen zum Ort des Geschehens hinzu.

Im Gehirn männlicher Mäuse fanden die Forscher mehr Mikrogliazellen, die zudem auch größer

waren als bei weiblichen Tieren. In isolierten Zellen identifizierte die Arbeitsgruppe mehr als 1000 Gene sowie 300 bis 400 Proteine, die je nach Herkunft unterschiedlich reguliert wurden. Etliche davon, die bei der Produktion von Abwehrmolekülen eine Rolle spielen, zeigten bei männlichen Tieren eine höhere Aktivität.

Zudem maßen die Forscher bei der männlichen Mikroglia eine höhere Membranspannung, und die Zellen reagierten stärker auf das Signalmolekül ATP, das etwa bei neuronalen Schädigungen ausgeschüttet wird. Die männlichen Immunzellen schienen demnach rascher alarmiert zu werden, gingen aber auch schnell-

er zu Grunde: Gene, die den programmierten Zelltod einleiten, waren bei ihnen aktiver, während weibliche Tiere eher auf DNA-Reparaturmechanismen setzten.

Bereits seit einigen Jahren kritisieren manche Wissenschaftler, dass Tierstudien oft nur an männlichen Versuchstieren durchgeführt werden und die Ergebnisse auf diesem Weg verzerrt werden könnten (siehe **Spektrum** März 2017, S. 41). Auf Grund ihrer Ergebnisse fordern Wolf und ihre Kollegen, dass Geschlechtsunterschiede bei der Erforschung neurologischer und psychiatrischer Erkrankungen stärker berücksichtigt werden sollten.

Cell Rep. 24, S. 2773–2783, 2018

INFORMATIK DER WAHRE KERN DER »ODYSSEE«

► Als sich Heinrich Schliemann Ende des 19. Jahrhunderts aufmachte und Troja finden wollte, verließ er sich auf Homers »Odyssee«. Dafür musste er harsche Kritik einstecken, schließlich galt das 2700 Jahre alte Epos damals als reine Fiktion. Heute halten

es manche Experten für möglich, dass Teile von Homers Erzählungen einen wahren Kern haben. Zu diesem Schluss kommen auf einem Umweg nun auch Wissenschaftler um Pedro Jeferson Miranda von der staatlichen Universität in Ponta Grossa, Brasilien. Sie haben die 342 Figuren der Heldensaga und deren Interaktionen am Computer modelliert und sie mit realen sozialen Netzwerken

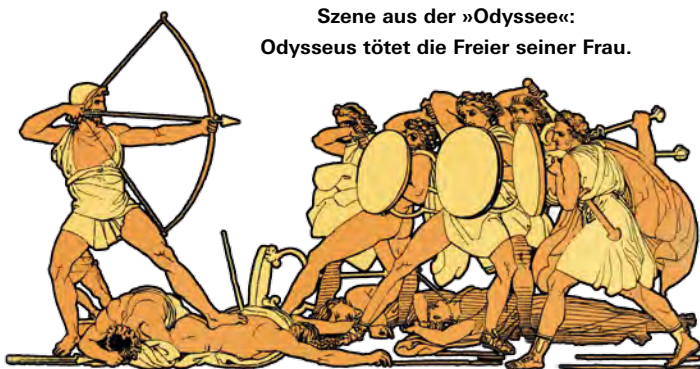
verglichen. Dabei stießen die Forscher auf eine Art universellen Fingerabdruck in Homers Werk, der charakteristisch für reale menschliche Gemeinschaften ist. Er zeigte sich allerdings erst, als das Team offenkundig fiktive Gestalten wie Zyklopen, Götter oder Meeresungeheuer aus der Analyse herausnahm.

In realen Gemeinschaften ist jedes Mitglied mit jedem anderen über wenige Zwischenschritte verbunden. Zudem zeichnen sich soziale Netzwerke meist durch eine Vielzahl von Verbindungen aus, vor allem zwischen einander ähnlichen Individuen. Daneben gibt es einige wenige zentrale Figuren, die sich nicht ausblenden lassen, ohne dass das Netz seinen Charakter verändert. Entfernt man hingegen zufällig ausgewählte Per-

sonen, bleibt es in der Regel weitgehend gleich.

Fiktive Figurenkonstellationen weichen von diesem Schema ab, selbst in komplexen Werken wie etwa dem »Herrn der Ringe« oder dem Comic-Universum von »Marvel«. War Homer einfach der bessere Geschichtenerzähler? Wahrscheinlicher ist, dass die Figurenkonstellation der »Odyssee« auf einer echten menschlichen Gemeinschaft basierte, argumentieren Miranda und seine Kollegen auf Grundlage ihrer Netzwerkanalyse. Damit unterscheidet sich das Werk von anderen mythologischen Erzählungen, wie etwa dem altirischen Epos vom »Rinderraub von Cooley« oder dem »Beowulf«, die Forscher bereits früher in dieser Hinsicht analysiert haben.

Plos One 13, S. 1–22, 2018



Szene aus der »Odyssee«:
Odysseus tötet die Freier seiner Frau.

WHITEMAY / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ASTRONOMIE ROTE NOVA FÄLLT AUS

► Es sollte ein Tag für die Geschichtsbücher werden: Im Jahr 2022 könnten Menschen einer roten Nova beiwohnen, verkündete der Astronom Lawrence Molnar vom Calvin College im US-Bundesstaat Michigan vor knapp zwei Jahren. Demnach sollte in rund vier Jahren ein roter Fleck im Sternbild Schwan auftauchen, hell wie der Polarstern – ein Ereignis, wie es viele Himmelsbeobachter wohl nur einmal im Leben sehen.

Nach bisherigem Verständnis werden rote Novae vom Zusammenstoß zweier Sterne ausgelöst, was enorme Strahlungsmengen freisetzt. Im Detail sind aber noch viele

Fragen offen. Die Vorgänge im 1800 Lichtjahre entfernten Sternsystem KIC 9832227 versprachen große Fortschritte beim Verständnis der seltenen Ereignisse: Molnars Beobachtungen zufolge kreisen dort zwei Sonnen umeinander und kommen sich dabei laufend näher – und 2022 sollte der Walzer seinen Höhepunkt erreichen.

Nun aber melden Astronomen große Zweifel an der Prognose an. Zum einen hat das Team um Quentin Socia von der San Diego State University 15 Jahre alte Aufnahmen des Vulcan-Fotometers aus dem Archiv gekramt. Zum anderen hat es Beobach-



2002 leuchtete eine rote Nova im 20 000 Lichtjahre entfernten Sternsystem V838 Monocerotis auf (hier eine Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops).

tungen aus der Northern Sky Variability Survey (NSVS) aus den Jahr 1999 noch einmal genauer angesehen. Beide legen nahe, dass sich die Sterne in KIC 9832227 bei Weitem nicht so schnell näherten wie gedacht. Die rote Nova finde daher auf absehbare Zeit doch nicht statt.

Socia's Team glaubt auch den Grund für die falsche Prognose ausgemacht zu haben: Molnar schlug die Zahlen aus der NSVS-Beobachtung in einer Variante des Fachaufsatzes nach, in der sich ein

Flüchtigkeitsfehler eingeschlichen hatte, und zwar ausgerechnet bei der Umrechnung zwischen zwei Zeitsystemen. Dadurch ging der US-Astronom für 1999 von einer falschen Umlaufdauer der beiden Sterne aus, was seine Vorhersage verfälschte. Das mag nach dem Start eines Forschungsstreits klingen, aber Molnar stimmt der kritischen Analyse seiner Kollegen vollständig zu. Irrtümer seien fester Bestandteil des wissenschaftlichen Fortschritts, teilt er mit.

Astrophys. Lett. 864, L23, 2018

MATERIALWISSENSCHAFT GRAPHEN AUS DER MIKROWELLE



Elektronenmikroskopaufnahme von lose aufgetürmten Graphenschichten.

nen, berichtet die Gruppe um Jin Zhang.

In Graphen ordnen sich Kohlenstoffatome in einem hauchdünnen, bienenwabenartigen Gitter an. Das verleiht dem Stoff eine enorme Stabilität und elektrische Leitfähigkeit. Bisher suchen Forscher aber noch nach einer Anwendung, die dieses revolutionäre Potenzial auch ausschöpft. Einer groß angelegten Kommerzialisierung steht bisher außerdem die Herstellung im Weg. Die beiden Stan-

dardverfahren – die so genannte Flüssigphasen-Exfolierung und die chemische Gasphasenabscheidung – liefern entweder nur Graphen mit geringer Qualität oder sind extrem aufwändig.

Wenn es nach Jin Zhang und seinen Kollegen geht, könnte das Mikrowellenverfahren diese Lücke schließen. Für ihren Versuch legten die Forscher mit Siliziumdioxid überzogene Siliziumscheiben in eine Quarzröhre und verdrängten die Luft in dieser mit Argon. Zudem erhitzen sie das Rohr in der Mikrowelle auf 700 Grad Celsius, wodurch sich an der unebenen Oberfläche des Siliziums so genannte Koronaentladungen bildeten. Schließlich speisten sie Methan ein.

Die extremen Bedingungen in der Röhre verwandelten einige der Methanmoleküle in Radikale. Diese fanden dann nach und nach zu größeren Kohlenstofflaggen zusammen, ähnlich wie Schneekristalle, an denen immer mehr Wassermoleküle hängen bleiben. Die Graphenkomplexe lagerten sich mit der Zeit auf der Innenseite der Röhre ab. Dort bildeten sie lose aufeinander gehäufte Komplexe, die einem anschließenden Belastungstest standhielten. Pro Stunde habe man 0,1 Gramm hochqualitatives Graphen hergestellt, berichtet das Team. Ob sich das Verfahren auch in größerem Maßstab umsetzen lässt, müssen weitere Tests zeigen.

Adv. Mater. 10.1002/adma.201803189, 2018

BIOLOGIE VEGETARISCHE HAIE

► Haie haben sich im Lauf der Evolution zu perfekt angepassten Fleischfressern entwickelt: Sie sind schnell, stark, haben messerscharfe Zähne sowie eine exzellente Spürnase. Zudem kann ihr Magen beträchtliche Mengen Fleisch schnell verwerten, was dabei hilft, den großen Energiebedarf bei der Jagd zu decken. Doch nicht alle Haie scheinen auf dieses Verhaltensmuster festgelegt zu sein, haben nun Ökologen um Samantha Leigh von der University of California in Irvine festgestellt. Der Schaufelnasen-Hammerhai (*Sphyrna tiburo*) kann Seegras fressen, gut verwerten und somit als Quasivegetarier wochenlang überleben.

Schon früher war aufgefallen, dass sich das rund ein Meter lange Tier in küstennahen Gewässern aufhält und dort gelegentlich ins Seegras beißt – vermeintlich versehentlich, wenn er auf der Jagd nach Krebsen und Weichtieren danebenschnappt. Leigh und ihre Kollegen wollten nun testen, ob mehr dahintersteckt: Sie gaben gefangenen Schaufelnasen-Hammerhaien drei Wochen fast nur mit Kohlenstoff-13 markiertes Seegras und gelegentlich Tintenfische zu

fressen. Anhand der Markierung konnten die Wissenschaftler nachvollziehen, ob die Pflanzendiät sofort wieder ausgeschieden oder verdaut wurde.

Tatsächlich verarbeiteten die Tiere die Pflanzen sehr effizient; sie zersetzten mehr als die Hälfte der verwertbaren Fasern der Seegrasrohkost. Die Haie wiesen zudem keinerlei Spuren einer Mangelernährung auf, sondern nahmen sogar an Gewicht zu. Der Verdauungsapparat der Schaufelnasen-Hammerhaie ist damit keineswegs nur auf reine Fleischkost optimiert, konstatieren die Forscher. Die Tiere verdauen Seegras ebenso gut wie junge Meeresschildkröten und deutlich besser als etwa Pandabären, die sich hauptsächlich vegetarisch von Bambus ernähren.

Das Verdauungssystem der Haie arbeitet offenbar mit einem ähnlichen Satz an Enzymen wie die Allesfresser unter den Fischen. Dabei scheint die Nahrung wie bei Pflanzenfressern vorbereitet zu werden: Die eher haiuntypisch breiten hinteren Zähne zermahlen das Seegras schon im Maul. Womöglich, spekulieren Leigh und ihre Kollegen, erfüllen die in den Seegraswiesen der Tropen weidenden Hai-Flexitarier eine ökologische Funktion, die man bisher übersehen hat.

Proc. R. Soc. B 285, 20181583, 2018

ARCHÄOLOGIE STEINZEITHIRTEN VERÄNDERTEN DIE SAVANNE

► Es wäre wohl übertrieben, die ostafrikanischen Savannen als Kulturlandschaft zu bezeichnen. Tatsächlich aber zeichnen sich die Landstriche an manchen, mit Gras bewachsenen Stellen durch eine beachtliche ökologische Vielfalt aus. Sie geht vermutlich auf jungsteinzeitliche Viehhirten zurück, berichtet ein internationales Team von Anthropologen und Archäologen um Fiona Marshall von der Washington University in St. Louis. In Kenia untersuchten die Forscher die Bodenbeschaffenheit an fünf etwa 3700 bis 1600 Jahre alten Siedlungsplätzen aus der Phase des von Weidewirtschaft geprägten »pastoralen« Neolithikums.

Die 60 bis 140 Meter großen Flächen wiesen im Vergleich zur Umgebung deutlich höhere Konzentrationen an Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Stickstoff, Magnesium und Kalzium auf, was auch mit einer vielfältigeren Flora einhergeht. An vier der Plätze gab es zudem eine bis zu 30 Zentimeter dicke graue Schicht aus feinkörnigem Material, das reich an Phytolithen und Spheruliten war.

Erstere sind mineralische Bestandteile von Pflanzenzellen, bei den zweiten handelt es sich um kugelförmige Kristalle, die Pflanzenfresser bei der Verdauung bilden. Beide gelangen mit dem Dung in den Boden. Daneben tauchten unter anderem Ammoniak sowie Stickstoff-15 auf, die wohl ebenfalls auf die Ausscheidungen von Tieren zurückgehen.

Vermutlich wurde das Vieh in der Jungsteinzeit über Nacht auf diesen Flächen eingepfercht, vermuten die Wissenschaftler. Die ökologischen Hotspots in der Savanne lassen sich jedenfalls kaum anders erklären, sie bedürfen nach Einschätzung von Experten einer konstanten Anreicherung über einen längeren Zeitraum hinweg. Termitenhügel haben zwar ebenfalls einen solchen Einfluss, doch nur im Umkreis weniger Meter. Die Pflanzenvielfalt der Savanne lockte wahrscheinlich Wildtiere an und veranlasste Hirten späterer Epochen, dort ihr Vieh weiden zu lassen. So gesehen wirkt die jungsteinzeitliche Nutzung bis heute nach und prägt Ostafrikas Landschaft.

Nature 561, S. 387–390, 2018

Der Schaufelnasen-Hammerhai kann Pflanzen erstaunlich gut verwerten.



MILLS BAKER / HAMMERHEAD (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/2727280/@NOB/4496434527) / CC BY 2.0 (CREATIVEDOMAINS.ORG/LICENSES/872/0/LEGALCODE)

TEILCHENPHYSIK TRÜGERISCHE ELEGANZ

Über Jahrhunderte haben Menschen immer wieder Teile des Codes erraten, in dem die Naturgesetze geschrieben sind. Nun aber scheinen die Forscher in einer Sackgasse gelandet zu sein.



Robert Gast ist Physiker und arbeitet als Redakteur bei Spektrum.

» [spektrum.de/artikel/1593994](https://www.spektrum.de/artikel/1593994)



AUF EINEN BLICK STREIT UM SCHÖNHEIT

- 1** Bei der Suche nach neuen Naturgesetzen verlassen sich Physiker seit Langem auf ihre mathematische Intuition: Schöne Formeln sind eher wahr als weniger elegante, meinen sie.
- 2** Die Physikerin Sabine Hossenfelder argumentiert in einem neuen Buch, Ästhetik sei kein wissenschaftliches Kriterium – sie habe Forscher schon oft in die Irre geführt.
- 3** Die Frankfurter Theoretikerin wirft viele wichtige Fragen auf, schießt aber aus Sicht mancher Physiker über das Ziel hinaus. Insbesondere die Symmetrie von Gleichungen gilt vielen Forschern nach wie vor als Schlüssel zum Verständnis des Mikrokosmos.

An »Fraktalmustern«
erkennt jeder, dass Mathe-
matik ästhetisch sein
kann. Meist ist die Eleganz
von Formeln aber deutlich
subtiler – und selbst für
Experten ist nicht immer
klar, wann eine Gleichung
schön ist.

Für Steven Weinberg ist die Sache klar: Gute Physiker sind wie Pferdezüchter. Im Stall erkennen diese auf den ersten Blick, welches Tier Rennen gewinnen kann. Bei der Suche nach neuen Naturgesetzen ist es so ähnlich, findet der Nobelpreisträger: »Jahrhunderte der Erfahrung mit der Natur haben uns ein ästhetisches Gespür dafür eingemeißelt«, sagte er einmal.

Weinberg weiß, wovon er spricht: Vor gut 50 Jahren war er maßgeblich daran beteiligt, die Theorie der »elektroschwachen Vereinheitlichung« auszuarbeiten. Ihre Gleichungen besagen, dass zwei der vier bekannten Kräfte im Universum – die schwache Kernkraft (die Atomkerne zerfallen lässt) und der Elektromagnetismus – bloß Facetten desselben Phänomens sind. Wenn man weit genug ins Innere der Materie hineinzoomt und Strukturen und Prozesse betrachtet, die gerade einmal ein Milliardstel eines milliardstel Meters (10^{-18} Meter) voneinander entfernt sind, kann man beide Kräfte nicht mehr voneinander unterscheiden.

Inspiziert hatten Weinberg und seine Kollegen elegante mathematische Strukturen, so genannte Symmetriegruppen. Mit einem Kniff, der dem Amerikaner 1967 in seinem roten Sportwagen auf dem Weg zur Arbeit einfiel, ließen sich die letzten Widersprüche der »elektroschwachen Vereinheitlichung« ausräumen. Zunächst war das nur ein schöner Gedanke. Aber bald darauf bestätigten Experimente an Teilchenbeschleunigern die Vorhersagen der Theorie – und machten Weinberg, Sheldon Lee Glashow und Abdus Salam 1979 zu Nobelpreisträgern.

Bis heute versuchen Physiker, an die Erfolge von damals anzuknüpfen. Mit großem Eifer suchen sie nach einem Weltmodell, das nicht bloß zwei, sondern alle vier bekannten Kräfte auf einen gemeinsamen Ursprung zurückführen kann. Idealerweise würde sich diese Urkraft durch eine »Theorie von allem« oder eine Art »Weltformel« beschreiben lassen – ein Traum, auf den schon Albert Einstein hinarbeitete (siehe »Die Theorie von allem«, S. 19).

Aber die Physiker kommen diesem Ziel, wenn überhaupt, nur langsam näher. Seit einigen Jahren wirkt es sogar so, als wären sie irgendwo falsch abgebogen. Der weltgrößte Teilchenbeschleuniger, der Large Hadron Collider (LHC) bei Genf, hat zwar 2012 das Higgs-Teilchen aufgespürt. Es war der letzte fehlende Baustein des Gedankengebäudes, das Weinberg und dutzende andere Forscher in den 1960er und 1970er Jahren entworfen haben. Dieses »Standardmodell der Teilchenphysik« beschreibt alle bekannten Elementarteilchen sowie die Kräfte, die zwischen ihnen wirken: Im Mikrokosmos spielen nicht nur Elektromagnetismus und schwache Kernkraft eine große Rolle, sondern auch die starke Wechselwirkung, die Quarks in Atomkernen aneinanderkettet.

Einerseits gilt das Standardmodell als Meisterwerk, schließlich beschreibt es die Welt der bekannten Elementarteilchen mit beeindruckender Präzision. Aber die Wissenschaftler hadern zunehmend mit der Theorie. Sie lässt eine ganze Reihe von Fragen offen – und ist damit wohl nicht das letzte Wort, wenn es darum geht, die Welt im Innersten zu verstehen. Warum zum Beispiel kann man manche der bekannten Elementarteilchen in drei Familien einordnen? Warum haben die geisterhaften Neutrinos eine

Masse, obwohl sie das laut Standardmodell eigentlich nicht dürften? Und warum scheint es so viel mehr Materie als Antimaterie im Universum zu geben?

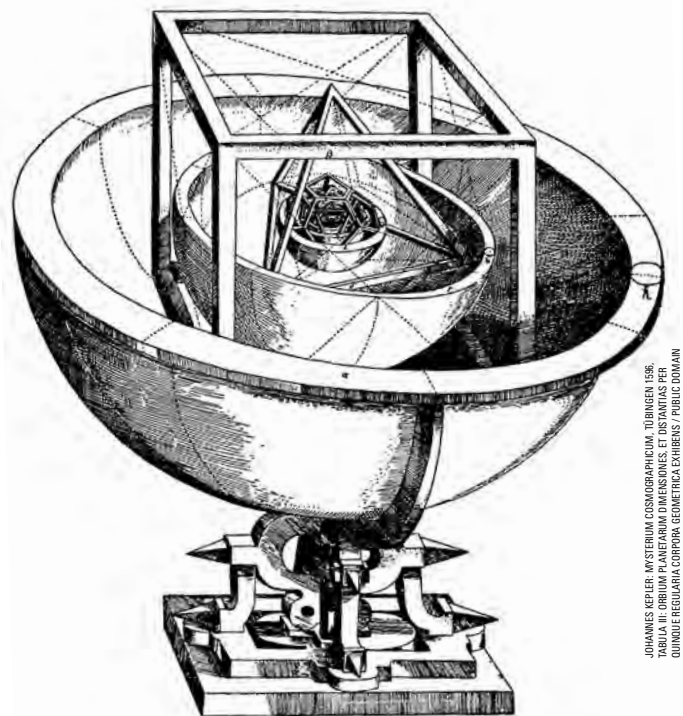
Auch tauchen weder Dunkle Materie noch Dunkle Energie im Standardmodell auf. Dabei sind die meisten Astrophysiker überzeugt davon, dass beide Phänomene den Kosmos grundlegend prägen. Die Dunkle Materie hält, so vermuten sie, mit ihrer Schwerkraft Galaxien zusammen. Die Dunkle Energie hingegen wirkt wie eine Art Antischwerkraft und beschleunigt die Expansion des Weltalls. Was sich hinter den beiden Erscheinungen verbirgt, ist schleierhaft. Es könnte sich um bisher unbekannte Teilchen oder Energiefelder handeln, die allerdings nicht im Regelwerk für den Mikrokosmos auftauchen.

Es fehlt eine Brücke zwischen Mikro- und Makrokosmos

Und schließlich ist da noch die Sache mit der Gravitation. Sie fällt in die Domäne von Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie, der anderen tragenden Säule der modernen Physik. Die Jahrhunderttheorie basiert auf ganz anderen mathematischen Konzepten und will partout nicht zum Standardmodell passen.

Die Theorie von allem wird eine Brücke zwischen den beiden Weltmodellen schlagen, glauben Forscher. Aber wie sieht sie aus? Vom LHC hatte man sich handfeste Hinweise erhofft: Im 27 Kilometer langen Kreistunnel der unterirdischen Anlage werden Wasserstoffatomkerne fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und dann zur

1596 war sich der Astronom Johannes Kepler ganz sicher: Die Bahnen der Planeten im Sonnensystem verlaufen auf den Ecken ineinander verschachtelter platonischer Körper. Das war ein ästhetisch ausgefeiltes Modell, das sich aber als unzutreffend entpuppte, wie Kepler irgendwann selbst erkannte.



JOHANNES KEPLER, MYSTERIUM COSMOGRAPHICUM, TUBINGEN 1596; TABULA III: ORBIUM PLANETARUM DIMENSIONES, ET DISTANTIAS PER QUINQUE REGULARIA CORPORA GEOMETRICA EXHIBENS / PUBLIC DOMAIN

Kollision gebracht, hunderte Millionen Mal pro Sekunde. Aus den Trümmern dieser Minikarambolagen können Experten rekonstruieren, wie Materiebausteine bei Abständen von 10^{-19} Metern miteinander interagieren. Die Maschine gleicht so gesehen einem riesigen Mikroskop.

Bevor die Messungen im Jahr 2009 starteten, waren die meisten Forscher zuversichtlich: Der LHC wird Hinweise auf neue Naturgesetze finden. Mittlerweile hat sich aber Ernüchterung breitgemacht. Der LHC hat bisher keine Fährte zu einer »neuen Physik« aufgespürt. Und das, obwohl die Wissenschaftler eine klare Favoritin für eine Theorie jenseits des Standardmodells hatten, die so genannte Supersymmetrie. Sie machte in den 1980er Jahren Karriere als extrem elegante und schlüssige Erweiterung des bisherigen Weltmodells, sie galt als wichtiger Schritt auf dem Weg zur Theorie von allem. Für Steven Weinberg und viele andere wirkte die Supersymmetrie wie das beste Pferd weit und breit. Sie sei »zu schön, um nicht wahr zu sein«, meinten Physiker.

Dann lief der LHC an – und keine Spur der ambitionierten Erweiterung zeigte sich. Nun sind die Teilchenphysiker in einer Situation, die sie im Vorfeld der LHC-Experimente ein wenig verstohlen als Albtraum-Szenario bezeichneten: Zwar haben zwei der haushohen Detektoren des LHC das Higgs-Teilchen nachgewiesen. Es ist der bereits 1964 vorhergesagte Schlussstrich unter dem Standardmodell, denn es erklärt, woher die anderen Elementarteilchen ihre Masse beziehen. Sonst ist allerdings nichts aufgetaucht, was den Weg zu einer neuen Theorie weisen könnte. Immerhin gehen die Forscher seit einiger Zeit verdächtigen Anomalien bei so genannten B-Mesonen nach (siehe **Spektrum** Februar 2018, S. 12), bei denen es sich aber auch bloß um statistische Ausreißer handeln könnte. Für die meisten Forscher wirkt es jedenfalls so, als sei man 30 Jahre lang einem Phantom hinterhergelaufen.

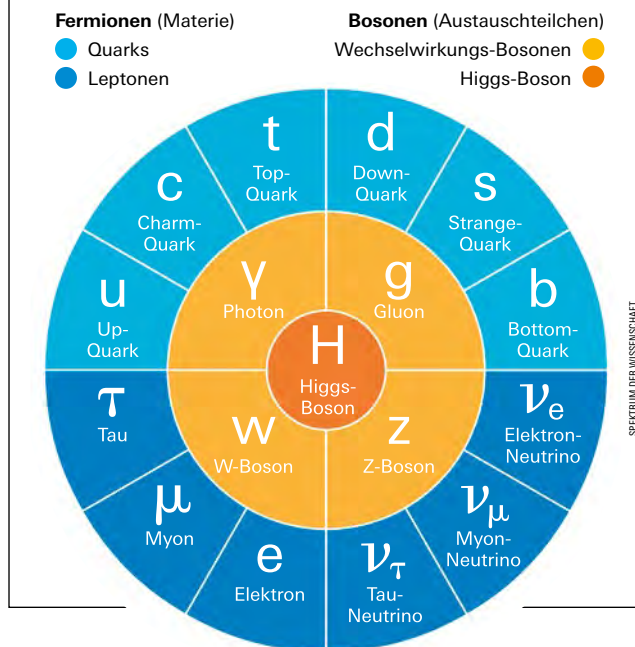
Entsprechend groß ist die Unsicherheit: Hat man sich von der Eleganz der Supersymmetrie in die Irre führen lassen? Ist die physikalische Intuition, die Weinberg und andere immer wieder beschworen haben, doch nicht so zuverlässig wie gedacht?

Lange haben die Gelehrten diese Fragen vor allem unter sich diskutiert. In den vergangenen Monaten hat sich das geändert: Die Physikerin Sabine Hossenfelder vom Frankfurt Institute for Advanced Studies hat ein viel beachtetes populärwissenschaftliches Buch über die gegenwärtige Krise der Teilchenphysik geschrieben, das auf Englisch unter dem Titel »Lost in Math« im Juni 2018 erschienen ist. Seit dem 26. September 2018 ist das Buch auch in Deutschland erhältlich (»Das hässliche Universum«, Fischer Verlag). Hossenfelder, die seit 15 Jahren auf dem Gebiet der Quantengravitation forscht, gewährt darin einen tiefen Einblick in den Maschinenraum der theoretischen Teilchenphysik – und macht die Obsession ihrer Kollegen für mathematische Ästhetik für die gegenwärtige Lage verantwortlich.

Eines ihrer Kernargumente: Seit den goldenen Zeiten in den 1970er Jahren hat sich die Teilchenphysik grundlegend verändert, die Forscher tragen diesem Umstand aber nicht genügend Rechnung. Damals lieferten Teilchenbe-

Das Standardmodell

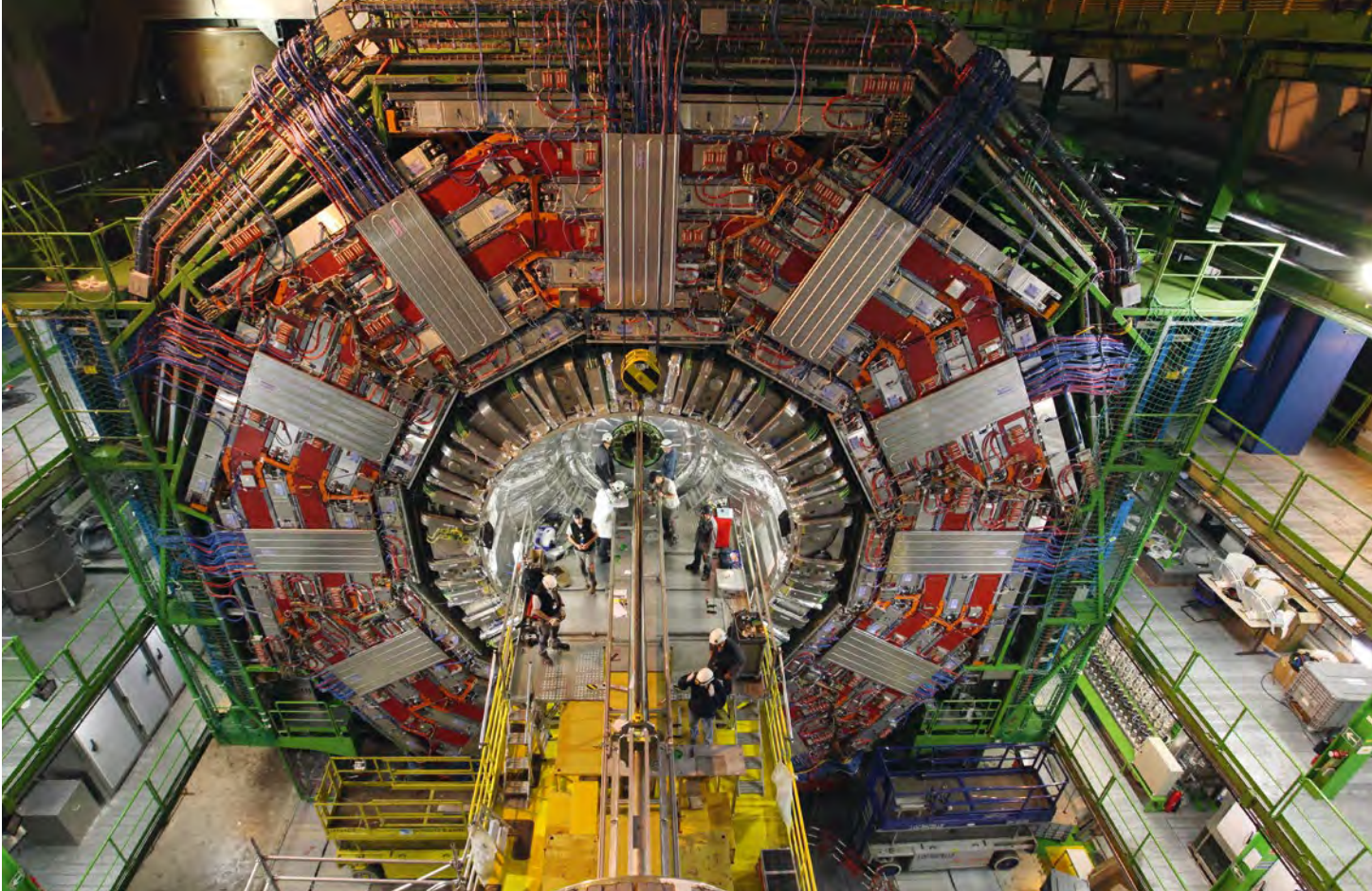
Sechs Quarks, drei Leptonen, drei Neutrino-Varianten, vier Arten von Austauschteilchen und ein Higgs-Boson – mehr braucht man nicht, um den bisher bekannten Mikrokosmos zu beschreiben.



schleuniger, die viel kleiner als der LHC waren, fast im Jahrestakt überraschende Messdaten – und Physiker aus den Theorieabteilungen entwickelten Ideen zu deren Deutung. Heute haben sich Experiment und Theorie weit voneinander entfernt. Zunächst mussten die Forscher lange auf den LHC warten. Nun liefert die riesige Maschine zwar neue Daten, sie entsprechen jedoch fast ausschließlich den Vorhersagen des Standardmodells und bedürfen daher keiner Interpretation mehr. Hoch spezialisierte Theoretiker, die einem enormen Publikationsdruck ausgesetzt sind, verbringen ihre Tage derweil damit, auf dem Reißbrett neue, denkbare Naturgesetze zu entwerfen. »Im Tempel des Wissens sind wir diejenigen, die im Keller graben«, schreibt Hossenfelder.

Sind schöne Pferde immer auch die schnellsten?

In den vergangenen Jahrzehnten ist so ein ganzer Dschungel an Modellen für Physik jenseits des Standardmodells gewachsen. Nur welche davon sind es wert, überprüft zu werden? Alle möglichen Hypothesen zu testen, ist unmöglich, gibt die Frankfurterin zu bedenken. Schließlich kosten die meisten großen Physikexperimente heutzutage viel Geld. Theoretische Physiker müssen also besonders aussichtsreiche Modelle auswählen – und so den Experimentatoren die Richtung vorgeben, in der sich die Suche am ehesten lohnt. Dabei gingen ihre Kollegen alles andere als wissenschaftlich vor, moniert Hossenfelder. »Sie glauben, Mutter Natur sei elegant und einfach und liefere uns



Mit den haushohen Detektoren des Large Hadron Collider bei Genf haben Physiker 2012 das Higgs-Teilchen aufgespürt. Sonst will einfach nichts auftauchen, was den Weg zu einer neuen Theorie des Mikrokosmos weist.

gütig Hinweise.« Aber das sei eine unwissenschaftliche Erwartung – schöne Pferde seien eben längst nicht immer die schnellsten, zumal Schönheit ein höchst subjektives Kriterium sei.

Das hätten Forscher eigentlich auch mit Blick auf die Supersymmetrie erkennen müssen, findet Hossenfelder. So gingen viele von ihnen bereits in den 1980er und 1990er Jahren davon aus, einige Eckpunkte des schönen Theoriegebäudes an den Teilchenbeschleunigern LEP und Tevatron zu erspähen, den Vorgängern des LHCs. Aber statt die Theorie nach dem Ausbleiben ad acta zu legen, hat man sie einfach umformuliert. Und zwar so, dass die von ihr vorhergesagten Teilchen am nächstgrößeren Beschleuniger auftauchen müssten.

Tatsächlich ist es für Physiker gar nicht so leicht zu sagen, wann eine Theorie schön ist. Zwar gibt es hier mehrere Kriterien. Diese hätten jedoch keine wissenschaftliche Basis und seien außerdem nicht frei von Widersprüchen, merkt Hossenfelder an. Zum Beispiel die Einfachheit: Je weniger griechische Symbole man benötigt, um potenzielle neue Naturgesetze zu beschreiben, desto besser – darin sind sich Physiker eigentlich einig. So gilt die elektroschwache Theorie auch deshalb als großer Wurf, weil sie eine Vielzahl komplexer Phänomene auf eine vergleichsweise einfache mathematische Struktur zurückführen kann und nur wenige lose Enden zurücklässt.

Andererseits wird beispielsweise die Stringtheorie wegen ihrer Schönheit bewundert, obwohl es sich um ein weitläufiges Theoriegebäude handelt. Es setzt auf zahlreiche neue mathematische Konzepte und sechs zusätzliche Raumdimensionen, um Schwerkraft und Quantenkräfte miteinander in Einklang zu bringen. Die Attraktivität der Stringtheorie geht daher aus Sicht von Physikern eher auf eine andere Eigenschaft zurück, auf Eleganz. Gemeint ist, dass Gleichungen ein überraschendes Element enthalten, etwa indem sie sich als viel weitreichender entpuppen, als man auf den ersten Blick erwartet.

Als Paradebeispiel gelten die vier Gleichungen der Elektrodynamik, die James Clerk Maxwell in den 1860er Jahren entwickelte. Sie passen einerseits auf jeden Bierdeckel. Bei richtiger Anwendung beschreiben sie allerdings nicht nur die Felder, die von einer elektrischen Ladung ausgehen. Letztlich steckt tief in den Maxwell-Gleichungen die Erklärung für zahlreiche andere Phänomene, etwa die Regeln, nach denen sich elektromagnetische Wellen ausbreiten.

Schwieriger zu verstehen ist das Kriterium der »Natürlichkeit«. Gemeint ist, dass eine Theorie keine unerklärbar großen oder kleinen Zahlen enthält und vor allem keine unerwartet starken Bezüge zu völlig anderen Größenordnungen. Das Kriterium hat eine zentrale Rolle beim Aufstieg der Supersymmetrie gespielt, ist aber mittlerweile umstritten (siehe »Am Ende der Natürlichkeit« ab S. 24).

Auf Basis ästhetischer Kriterien beurteilt die Gemeinschaft der Teilchenforscher jedenfalls routiniert, welche Modelle für Physik jenseits des Standardmodells eine Chance haben, wahr zu sein. Hossenfelder ist das zunehmend suspekt. Was viele ihrer Kollegen vergäßen: Mathe-

matische Ästhetik habe Physiker schon oft in die Irre geführt. Zum Beispiel im 16. Jahrhundert, als der Astronom Johannes Kepler die Bahnen der Planeten im Sonnensystem mit Hilfe ineinander verschachtelter platonischer Körper erklären wollte (siehe Abbildung S. 16). Oder Ende des 19. Jahrhunderts, als Physiker glaubten, Atome seien in Wahrheit winzige Wirbel, die sich mit Hilfe der eleganten Knotentheorie beschreiben lassen.

»Die Wissenschaftsgeschichte ist nicht nur reich an schönen Ideen, die sich als falsch erwiesen«, schreibt die Physikerin in ihrem Buch, »sondern wir haben umgekehrt auch all die hässlichen Ideen, die sich als richtig herausstellten.« Viele Naturgesetze würden bloß deshalb als elegant empfunden, weil sich Forscher an sie gewöhnt hätten. Ein Beispiel dafür sei die Quantenphysik, deren ungewohnter Formalismus und bizarre Interpretation viele ihrer Gründerväter unglücklich zurückließ. Sogar James Clerk Maxwell sei an den nach ihm benannten Gleichungen verzweifelt, da sie nicht in das mechanistische Weltbild seiner Zeit passten. Für Hossenfelder belegen diese und andere Episoden, dass ästhetische Ansprüche bei der Suche nach neuen Naturgesetzen ineffektiv sind: Sie funktionierten so lange, bis sie einen im Stich ließen.

Einsteins Theorie war zunächst nur ein elegantes Gedankengebäude

Andererseits sind die Erfolge, die auf das Konto ästhetischer Überlegungen gehen, durchaus beeindruckend: So war Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie bei ihrer Veröffentlichung 1915 zunächst nur ein elegantes, in sich stimmiges Gedankengebäude, das gut zu all dem passte, was Physiker damals über die Natur wussten. »Dem Zauber dieser Theorie wird sich kaum jemand entziehen können, der sie wirklich erfasst hat«, schrieb Einstein stolz. Erst später wurde klar, dass er den richtigen Riecher gehabt hatte. Mit Blick auf die Vergangenheit dürften die meisten Physiker also sagen: Ästhetische Kriterien können eben doch funktionieren – auch wenn sie längst nicht immer zuverlässig sind und mitunter eher einem Bauchgefühl ähneln, das durch die Sozialisation mit dem bestehenden Naturgesetzeskanon entstanden ist.

Die Entwicklung des Standardmodells ist geradezu ein Paradebeispiel für die Macht von zur Mode gewordenen Präferenzen. Dort spielte ein viertes Kriterium neben Einfachheit, Eleganz und Natürlichkeit eine Schlüsselrolle: die Symmetrie (siehe »Verblüffende Symmetrie«, S. 21). Gemeint ist, dass bestimmte Eigenschaften eines Objekts gleich bleiben, wenn sich sein Umfeld ändert – grob gesagt. Letztlich lassen sich alle Wechselwirkungen im Standardmodell durch Forderungen dieser Art herleiten. Und auch Einstein entwickelte seine allgemeine Relativitätstheorie auf Basis von Symmetrieüberlegungen, da er auf Widersprüche zwischen seiner speziellen Relativitätstheorie und Newtons Mechanik gestoßen war.

»Die wichtigste Lehre aus diesem Jahrhundert ist, dass der Natur Symmetrieprinzipien zu Grunde liegen«, bilanzierte der Nobelpreisträger David Gross im Jahr 1996. Die leidenschaftlichste Würdigung der verblüffenden Verknüpfung von Mathematik und physikalischer Wirklichkeit

Die Theorie von allem

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik beschreibt den Mikrokosmos als Wechselspiel von Teilchen und Feldern, die dem Wahrscheinlichkeitscharakter der Quantenphysik unterliegen. Drei der vier bekannten Kräfte (Elektromagnetismus, schwache und starke Kernkraft) finden in dem Regelwerk Platz. Die Schwerkraft hingegen fällt in die Domäne von Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie, der anderen tragenden Säule der modernen Physik. Mit ihr erfassen Physiker das große Ganze, also Monde, Planeten und Galaxien. Ihr zufolge ist das, was wir Schwerkraft nennen, bloß eine mehr oder weniger starke Krümmung der Raumzeit.

Die Gravitation ist die schwächste aller Kräfte, dafür überwindet sie riesige Strecken. Bei Abständen von milliardstel milliardstel Metern, auf denen die Kernkräfte des Standardmodells herrschen, löst sie hingegen normalerweise nicht mal ein schwaches Ziehen aus. Aber was, wenn man ein Reich beschreiben will, in dem die Schwerkraft so stark wird, dass sie selbst im Mikrokosmos spürbar ist? Im Inneren von Schwarzen Löchern wäre das vermutlich der Fall, und auch direkt nach dem Urknall müsste die Schwerkraft der extrem dichten Materie in Konkurrenz zu den Kräften des Standardmodells getreten sein. Für diese Situationen muss also eine Symbiose her, glauben Physiker, eine »Theorie von allem«, gerne »Weltformel« genannt, aus der alle bekannten Naturgesetze folgen.

Allerdings passen Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie überhaupt nicht zusammen. Teilchen und Wahrscheinlichkeiten hier, gekrümmte Raumzeit und Determinismus dort. Zwar gibt es mittlerweile mehrere Ideen für eine übergeordnete Theorie, von denen die Stringtheorie am weitesten entwickelt ist. Wirklich sicher, dass man damit der Wahrheit auf der Spur ist, sind die Physiker aber nicht. Testen lassen sich Theorien der Quantengravitation bisher allenfalls indirekt – schließlich kann niemand ins Innere eines Schwarzen Lochs sehen. Das hält Experten jedoch nicht davon ab, immer neue denkbare Erweiterungen des Standardmodells zu erarbeiten. In den vergangenen Jahrzehnten ist ein ganzer Dschungel an Theorien gewachsen, die bisher unverstandene Aspekte der Wirklichkeit mit spekulativen Teilchen, Feldern, Kräften oder Raumzeitgeometrien erklären wollen und die ein Fortschritt in Richtung Weltformel wären. Aber welche der Theorien beschreibt tatsächlich die Wirklichkeit?

stammt indes von Frank Wilczek, der 2004 an der Seite von Gross den Nobelpreis für die Entschlüsselung der starken Kernkraft erhielt.

Die allermeisten Gleichungen, die man sich ausdenken könne, schreibt Wilczek in seinem 2015 erschienenen Buch »A Beautiful Question«, seien nicht symmetrisch. »Indem wir Symmetrie einfordern, können wir also besondere Gleichungen entdecken.« Damit werde letztlich ein Traum der alten Griechen wahr: eine Natur, die auf Harmonie und konzeptueller Reinheit basiert. Anders formuliert: Die Physiker seien gewissermaßen auf den tief in der Mathematik verborgenen Stil gestoßen, in dem die Naturgesetze geschrieben sein sollen. Der Amerikaner geht sogar so weit, das Universum als »Kunstwerk« zu bezeichnen – wenngleich er nicht sagen kann, wer oder was es hervorgebracht hat.

Für Wilczek ist Schönheit in der Physik daher schlichtweg das, was in der Vergangenheit funktioniert hat: die Konzepte, die Forscher in früheren Jahrzehnten und Jahrhunderten auf die Spur von Naturgesetzen geführt haben und den nachwachsenden Forschergenerationen in Fleisch und Blut übergegangen sind.

Die größte Symmetrie von allen

Das würde erklären, wieso die Supersymmetrie so populär wurde. Sie gilt als Krönung des Symmetriegedankens – als größte Symmetrie, die es in der Natur geben kann. Die Theorie gibt vor, dass die uns bekannten Elementarteilchen bloß eine Hälfte der Realität sind. Parallel zu ihnen gestatten die Naturgesetze noch die Existenz einer dazu korrespondierenden Teilchensippe, die über die Supersymmetrie direkt mit den bekannten Partikeln verknüpft wäre.

Die Theorie brilliert auch dadurch, dass sie die Vereinheitlichung der Kräfte deutlich voranbringen würde: Ihre Formeln besagen, dass bei winzigen Abständen von

Frank Wilczek (67) hat wichtige Beiträge zum Verständnis der starken Kernkraft geleistet und erhielt dafür 2004 den Nobelpreis. Er ist Professor am Massachusetts Institute of Technology und gilt als einer der einflussreichsten Physiker seiner Generation.



CHARLIE EBBERT / ASU NOW



JÖRG STEINMETZ

Sabine Hossenfelder (42) forscht am Frankfurt Institute for Advanced Studies. Zuvor arbeitete sie am Nordric Institute for Theoretical Physics in Stockholm und am renommierten Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo. Unter »backreaction.blogspot.com« bloggt sie über neue Entwicklungen in der Physik.

unvorstellbaren 10^{-30} Metern die elektroschwache und die starke Kraft auf einen gemeinsamen Ursprung zurückgehen müssten. Physiker sprechen von der »großen Vereinheitlichung«, mit der bereits drei Kräfte im Universum auf ein gemeinsames Fundament gestellt wären. Viele der Supersymmetrie-Inkarnationen würden außerdem einen Teilchenkandidaten für die Dunkle Materie liefern. »Sie wäre eine tiefeschürfende neue Verkörperung von Schönheit in der Natur«, meint Frank Wilczek.

Nur wo versteckt sie sich dann? Für Wilczek und andere ist es noch zu früh, um die Suche endgültig aufzugeben: Es seien bisher nicht alle Fassungen des Supersymmetrie-Gedankens falsifiziert. Die hypothetischen Superpartner-Teilchen könnten einfach viel schwerer sein als gedacht – auch wenn man dann eine Erklärung bräuhete, weshalb das so ist, was den ästhetischen Reiz der Theorie aus Sicht vieler Physiker mindern würde.

Wilczek hofft trotzdem, dass Hinweise auf sie in den nächsten Jahren doch noch auftauchen. Sabine Hossenfelder hingegen hält genau dieses Festhalten an alten Lieblingen für das zentrale Problem der heutigen Teilchenphysik: »Ich sehe keinen großen Unterschied zwischen dem Glauben, die Natur sei schön, und dem Glauben, Gott sei gütig.«

Ihr Buch zeigt jedenfalls, dass nicht nur sie sich Gedanken über die Zukunft ihrer Disziplin macht. Die Physikerin hat zahlreiche Interviews mit Kollegen geführt, die ihr auch offenherzig Auskunft gegeben haben. Der Supersymmetrie-Experte Michael Krämer von der RWTH Aachen etwa sagt zu ihr, er fühle sich dieser Tage einfach nur verwirrt. Keith Olive von der University of Minnesota meint wiederum ziemlich bedrückt, all die leichten Sachen habe man gemacht. »Von nun an wird es schwierig.«

Und Frank Wilczek gesteht im Gespräch mit Hossenfelder: »Allmählich mache ich mir Sorgen.« Unbeirrt gibt sich dagegen der einflussreiche US-Theoretiker Nima Arkani-Hamed, den sie während eines Forschungsaufenthalts in Dänemark besucht. Dieses ganze Gerede über die Ästhetik der Physik sei ziemlicher Unsinn, schimpft er. Es basiere im Kern auf einer populärwissenschaftlichen Fehlwahrnehmung.

In Wahrheit sei es enorm schwierig, überhaupt überzeugende schlüssige Theorien für neue physikalische Phänomene zu entwickeln, sagt Arkani-Hamed. Schließlich bildeten sowohl die allgemeine Relativitätstheorie als auch das Standardmodell, die beide experimentell bestens überprüft sind, extrem rigide Leitplanken. »99,99 Prozent unserer Ideen werden verworfen, und zwar nicht auf Grund neuer Experimente, sondern weil sie mit alten nicht vereinbar sind.«

Schreckgespenst des Postempirismus

Der Gedanke spielt eine Schlüsselrolle in Hossenfelders Buch, gewissermaßen als Schreckgespenst, vor dem sie und andere eindringlich warnen: Ohne empirische Daten könnten mathematische Konsistenz und Ästhetik zu den einzigen Lotsen auf der Suche nach neuen Naturgesetzen werden. Und manchen Physikern würden diese Kriterien möglicherweise bereits genügen, um eine hinreichend

ausgearbeitete Theorie für wahr zu erklären. Hinweise darauf liefert etwa ein 2013 erschienenes Buch des Wissenschaftsphilosophen Richard Dawid, das großen Anklang in der Teilchenphysiker-Community fand. Darin argumentiert der Forscher von der Universität Stockholm, dass Anhänger der Stringtheorie längst postempirische Argumente heranziehen, um die aufwändige Arbeit an ihrem bevorzugten Weltmodell zu rechtfertigen. Diese verweisen beispielsweise darauf, dass es keine ähnlich überzeugende Alternative für eine Synthese aus Quantenphysik und Relativitätstheorie gebe. Außerdem weise die Mathematik der Stringtheorie ein festes Fundament auf, und aus den verwendeten Konzepten ergäben sich überraschende Konsequenzen, etwa in Form der Anwendung auf Phänomene in der Festkörperphysik.

Gilt eine »Theorie von allem« also irgendwann schon dann als wahr, wenn sie die einzige weit und breit ist, die keine Widersprüche zu etablierten Naturgesetzen hervorruft? Der Gedanke bringe sie ins Schwitzen, schreibt Hossenfelder. Frank Wilczek sieht das ähnlich: »Ich finde nicht, dass wir bei dieser Idee der postempirischen Physik Kompromisse machen sollten«, sagt er. Der Gedanke sei wirklich abstoßend.

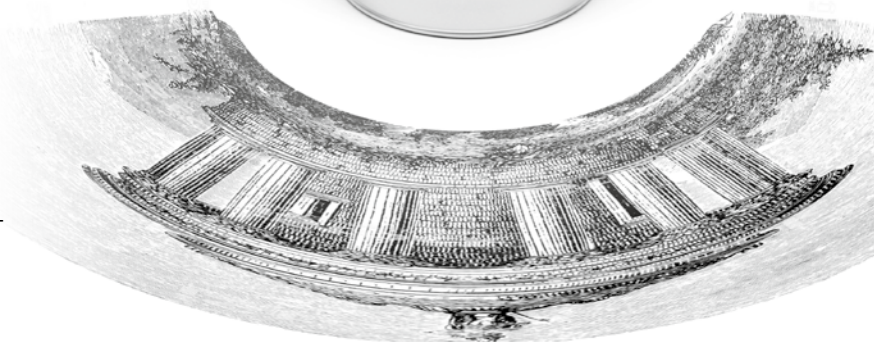
Auch ein anderer großer Denker hadert mit dem Postempirismus: In Austin spricht Hossenfelder mit dem mittlerweile 85 Jahre alten Steven Weinberg. Am Ende

Verblüffende Symmetrie

Wenn Physiker von Symmetrie reden, meinen sie, dass eine Messgröße gleich bleibt, obwohl sich etwas anderes verändert. Einen Ball etwa kann man beliebig drehen, ohne dass sich seine Eigenschaften verändern, er ist »rotationssymmetrisch«. In der Welt der Elementarteilchen gibt es abstraktere Symmetrien, und sie spielen dort eine Schlüsselrolle. So bleiben die drei Kräfte des Standardmodells just unter den Transformationen der drei Lie-Symmetriegruppen $U(1)$, $SU(2)$ und $SU(3)$ unverändert – eine verblüffende Verknüpfung von komplexer Mathematik und physikalischer Wirklichkeit.

Eine der besten Analogien ist anamorphe Kunst, bei der ein stark verzerrtes Bild eines Gegenstands durch geschickte Spiegelung in sein uns vertrautes Aussehen überführt wird (siehe Bild rechts). Dazu muss der Künstler die Krümmung des reflektierenden Zylinders und die Form des verzerrten Objekts auf der Papierfläche genau aufeinander abstimmen – nur dann erscheint in unserem Beispiel das Bild eines Tempels im Spiegel.

So ähnlich ist es in der Teilchenwelt: Hier können Situationen, die auf den ersten Blick völlig verschieden sind, durch die richtige »Spiegelung« ineinander überführt werden. Ein Elektron an einer Stelle kann sich etwa in ein Elektron-Neutrino an einer anderen Stelle verwandeln – aber nur, wenn man eine Transformation ausführt, die genau der schwachen Wechselwirkung aus dem Standardmodell entspricht.



TEMPEL: MASTASC / GETTY IMAGES / ISTOCK; METALLZYLINDER: CUSTOMDESIGNER / GETTY IMAGES / ISTOCK; BARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT



FLAMINGO/PHOTO GETTY IMAGES/ISTOCK

Die Natur hat eine Vorliebe für symmetrische Formen und Muster, zum Beispiel bei Schneckenhäusern. Bei der mathematischen Beschreibung des Mikrokosmos scheint Symmetrie sogar das grundlegende Ordnungsprinzip zu sein. Steckt dahinter eine Art Masterplan?

glaube er nicht, dass mathematische Konsistenz genug sein werde, um eindeutig eine Theorie von allem zu identifizieren, gesteht die graue Eminenz der Physik. Insgesamt wirkt er auf Hossenfelder jedoch immer noch wie jemand, der davon ausgeht, dass die Physiker mit ihrem Verstand irgendwann dorthin finden werden.

»Ach, wie gerne würde ich das glauben!«, schreibt sie. Aber sie könne es einfach nicht. Allein schon deshalb, weil der Blick auf die heutige Wissenschaft zu dieser Hoffnung nicht berechtige. Schließlich habe sich die Forschung seit den Tagen von Weinbergs Erfolgen stark verändert. Es gebe zwar immer mehr Physiker, aber sie widmeten sich zunehmend voneinander isolierten Problemen in dutzenden Nischendisziplinen. Auch hätten der ökonomische Druck und die Unsicherheit in der akademischen Welt enorm zugenommen. Damit brächten immer weniger Forscher den Mut auf, an unpopulären Theorien zu arbeiten und potenziell visionäre Gedanken zu verbreiten. Vielmehr habe sich ein ausgeprägter Herdentrieb breitgemacht – die meisten ihrer Kollegen folgten brav dem Mainstream. Dabei seien etwa an der Basis der Quantenphysik noch wichtige Fragen offen, denen sich kaum jemand widme, da die Arbeit daran mühsam und glanzlos sei.

Generell fordert Hossenfelder mehr Selbstdisziplin von ihren Kollegen: Statt blind der Herde hinterherzurennen und möglichst populäre Luftschlösser zu entwerfen,

sollten sie lieber bodenständige Modelle austüfteln, die eine Chance haben, mit bezahlbaren Experimenten überprüft zu werden. »Wertschätzung für Schönes und der Wunsch, sich anzupassen, sind menschliche Züge«, findet sie. Aber damit einher gingen eben auch Wahrnehmungsverzerrungen, die bisher kaum beachtet würden. Daneben müsse sich das Wissenschaftssystem verändern. Sie schlägt beispielsweise vor, dass Nachwuchsforscher nicht mehr dazu angehalten werden sollten, möglichst viele Veröffentlichungen zu schreiben. Stattdessen sollten lieber ungewöhnliche und kreative Gedanken belohnt werden.

Können Menschen den Code der Naturgesetze überhaupt verstehen?

Hossenfelders Kollegen würden viele dieser Vorschläge sicher unterschreiben. Ihre Kritik an der mathematischen Ästhetik wird viele Teilchenphysiker wohl nur bis zu einem gewissen Punkt überzeugen. »Schönheit ist nur ein Mittel zum Zweck, um erfolgreiche Theorien zu entwickeln«, meint etwa Steven Weinberg. Und Frank Wilczek argumentiert, es sei nun einmal die Aufgabe von Theoretikern, ansprechende Ideen zu entwickeln. Was sollen sie auch sonst tun?

Und doch dürfte viele Physiker heute das Gefühl beschleichen, dass es nicht die richtige Form von Schönheit ist, nach der sie Ausschau halten. Der Code, in dem die Naturgesetze des Universums geschrieben sind, ist offenbar schwieriger zu entschlüsseln als gedacht. Vielleicht ist er am Ende zu kompliziert, als dass Menschen ihn bis ins letzte Detail verstehen können?

Auch das Gegenteil ist denkbar: Möglicherweise befinden sich die Wissenschaftler bloß in einer ähnlichen Situation wie zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Damals hatten Laborversuche wie das Michelson-Morley-Experiment Widersprüche im Weltbild der klassischen Physik zu Tage gefördert. Erst die Entwicklung von Relativitätstheorie und Quantenphysik in den kommenden Jahrzehnten klärte die Sache auf.

Jedenfalls haben Physiker den Kampf noch lange nicht aufgegeben: Am LHC suchen sie weiter nach Abweichungen vom Standardmodell. Mit immer größeren Untergrunddetektoren halten sie nach Partikeln Ausschau, aus denen die Dunkle Materie bestehen könnte. Und neue Teleskope sollen in den nächsten Jahren die Auswirkungen der Dunklen Energie genauer als bisher erforschen. Parallel dazu werden sie das Weltall nach Quellen von Gravitationswellen absuchen und dabei die Vorhersagen von Einsteins Relativitätstheorie detailliert testen. Im Idealfall spuckt eines dieser Projekte einen Befund aus, der theoretische Physiker auf die richtige Spur bringt. Und vielleicht handelt es sich ja diesmal um ein Pferd, das wirklich das Rennen macht. ◀

QUELLEN

Gross, D.: The Role of Symmetry in Fundamental Physics. In: PNAS 93, S. 14256–14259, 1996

Hossenfelder, S.: Das hässliche Universum. Fischer, Frankfurt am Main 2018

Wilczek, F.: A Beautiful Question. Penguin, London 2015

Neues Denken.

Die Entwicklungen des Jürgen Schmidhuber im FOCUS.

WIRTSCHAFT

Die KI-Revolution

Algorithmen diagnostizieren Krebs, sagen Aktienkurse voraus und schreiben Drehbücher. **Künstliche Intelligenz**, abgekürzt KI, verändert alles – die Wirtschaft, die Gesellschaft, unser aller Leben. Deshalb lädt die Bundesregierung nun auch zum ersten KI-Gipfel ein

Die Schöpfung

Der iCub ist ein babyähnlicher Roboter. Schmidhuber und sein Team verwenden ihn, um künstliche Neugier zu implementieren und sein Verhalten zu studieren



FOCUS 20/2018

FOCUS 20/2018

Menschen im

FOCUS




NATURGESETZE AM ENDE DER NATÜRLICHKEIT

Im Herzen des Mikrokosmos sind Physiker auf etwas gestoßen, was wie ein extremer Zufall aussieht. Ist das die lang ersehnte Fährte zur Weltformel? Oder nur der Punkt, an dem die bisherigen mathematischen Werkzeuge ihre Wirksamkeit verlieren?

Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei Spektrum.

► spektrum.de/artikel/1593996

Ein Bleistift, der auf seiner Spitze stehen bleibt – das kann es eigentlich nicht geben, oder? Mit ähnlichem Unglauben blicken Physiker aktuell in den Mikrokosmos: Dort nimmt ein wichtiger Parameter einen in mancher Hinsicht sehr überraschenden Wert an.



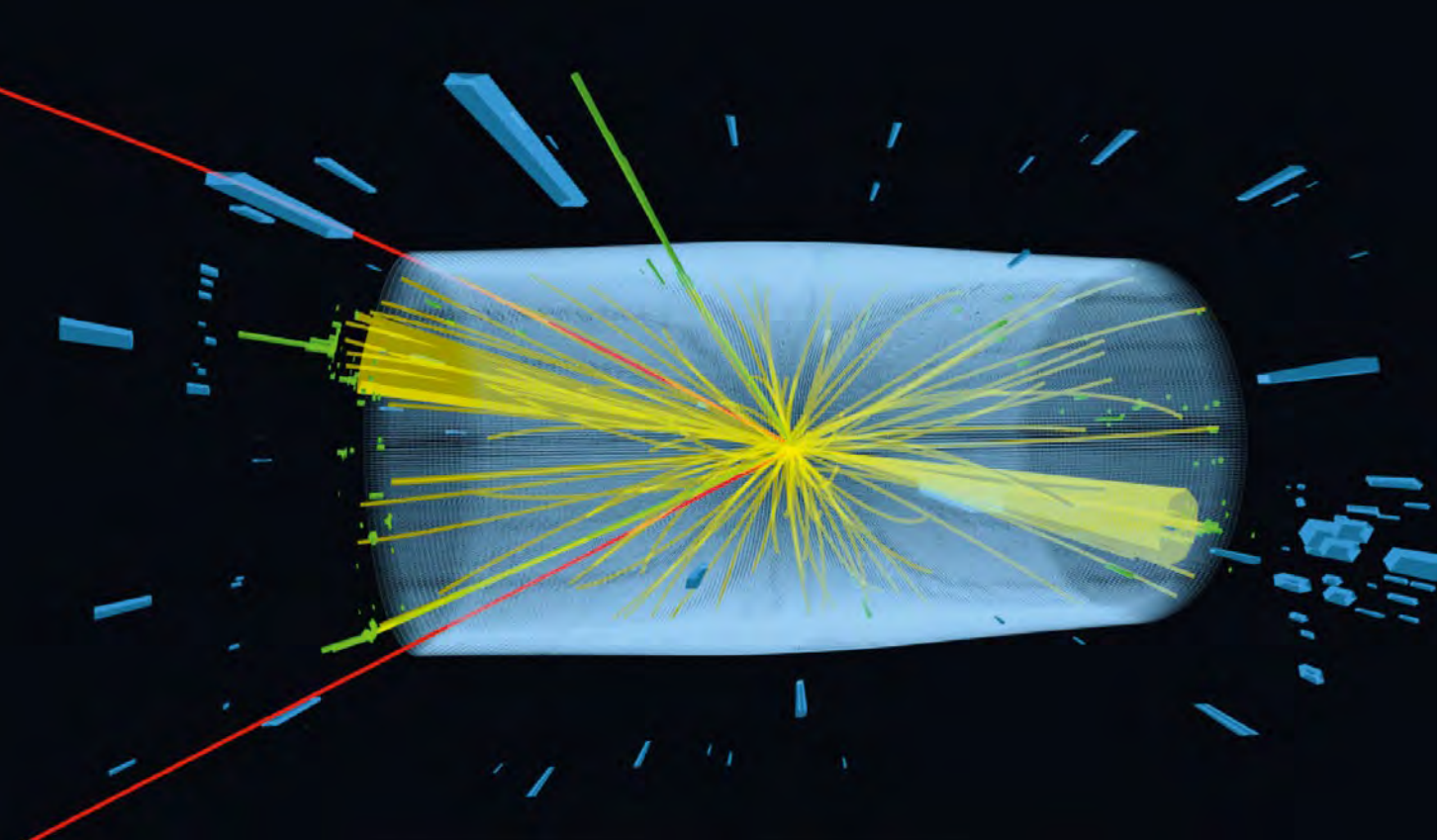
Der grüne Laserpointer kreist wie wild über dem griechischen Buchstaben. Immer wieder kehrt er zu dem Symbol zurück, das Außenstehende leicht für ein Tipi halten könnten, an dessen Spitze jemand eine kleine Zwei gemalt hat: Λ^2 . Kann sich hinter einem so harmlosen Zeichen Unheil verbergen? »Ich habe solche philosophischen Fragen lange für eher unwissenschaftlich gehalten«, sagt Holger Gies. Aber nun steht der groß gewachsene Theoretiker doch in einem Seminarraum der RWTH Aachen und spricht vor Physikern und Philosophen genau darüber: ob »Lambda« die Teilchenphysik in die Krise geführt hat.

Der griechische Buchstabe war lange Zeit ein Hoffnungsträger bei der Suche nach einer neuen Theorie für den Mikrokosmos. Λ taucht im bisherigen Regelwerk, dem Standardmodell der Teilchenphysik, an einer Schlüsselstelle auf. Das Symbol fällt dort jedoch dermaßen aus dem Rahmen, ist dermaßen »unnatürlich«, dass Wissenschaftler es jahrzehntelang für einen Hinweis auf bisher unentdeckte Naturgesetze hielten. Für eine kosmische Fügung, die viel zu unwahrscheinlich ist, um ein Zufall zu sein. Die geradezu nach einer Erklärung schreit – und die idealerweise den Weg in Richtung Weltformel weist.

Aber in den vergangenen Jahren hat sich die Lage geändert. Der Large Hadron Collider (LHC) bei Genf hat bisher wider Erwarten keine Hinweise auf ein neues Weltmodell geliefert (siehe »Trägerische Eleganz« ab S. 14). Nun ragt Lambda grotesker aus der Teilchenwelt hervor als jemals zuvor. »Es ist merkwürdig, dass ausgerechnet das Standardmodell unnatürlich sein soll«, sagt Holger Gies.

Daher hat der Physiker von der Universität Jena Anfang 2018 seinen Koffer gepackt und ist nach Aachen gefahren, zu einer Konferenz, auf der sich 40 Experten aus aller Welt über das »Natürlichkeitsproblem« ausgetauscht haben. Im Generali-Saal der Universität, hoch über dem Februardunst der Altstadt, hat Gies seine Sicht der Dinge vorgetragen, hat abends beim Bier mit Kollegen zusammengesessen und immer wieder dieselbe Frage diskutiert: Wie kommen wir weiter bei der Entschlüsselung des Mikrokosmos?

Lange Zeit sah es so aus, als hätten die Wissenschaftler den Masterplan der Natur entdeckt. Seit Jahrhunderten dringen sie immer tiefer ins Innere der Materie vor, zu-



THOMAS MACAULEY, CERN 2016, FOR THE BENEFIT OF THE CMS COLLABORATION

nächst mit Mikroskopen, dann mit Teilchenbeschleunigern. Was die Forscher dort entdeckten, folgt einer erstaunlichen Ordnung: Die Welt scheint aus gerade einmal einem Dutzend verschiedener Elementarteilchen-Typen zu bestehen, zwischen denen vier unterschiedliche Kräfte wirken (siehe »Das Standardmodell«, S. 17).

Der Elektromagnetismus drückt gleichgepolte Elektronen auseinander, die »schwache« Kernkraft lässt Atomkerne zerfallen, die »starke« Wechselwirkung kettet Quarks aneinander – und die Gravitation hält Menschen auf dem Boden der Tatsachen. Letztere ist die schwächste aller Kräfte. Sie wirkt über riesige Strecken, lässt sich aber nicht mit demselben mathematischen Formalismus wie die anderen Kräfte fassen. Deshalb fehlt die Schwerkraft im Standardmodell – einer von mehreren Makeln der Theorie, die alle anderen Einsichten in den Mikrokosmos elegant zusammenfasst.

Die Krönung der Teilchenphysik stürzte sie gleichzeitig in die Krise

Im Jahr 2012 bestätigten tausende Forscher am LHC-Beschleuniger dann die letzte Grundannahme des Weltmodells: Sie entdeckten das Higgs-Teilchen. Es erklärt, wie Elementarteilchen ihre Masse bekommen, und brachte seinem Namenspaten Peter Higgs und dem Belgier François Englert im Jahr 2013 den Physik-Nobelpreis ein (siehe **Spektrum** Dezember 2013, S. 19).

Was im Jubel damals unterging: Das Higgs beschert der Teilchenphysik ein großes konzeptionelles Problem. »Eigentlich müsste seine Masse sehr viel größer sein«, sagt der Physiker Robert Harlander von der RWTH Aachen, einer der Organisatoren der Aachener Konferenz zum Natürlichkeitsproblem. So wirkt es zumindest, wenn Wissenschaftler das Higgs mit Hilfe der Quantenfeldtheorie beschreiben, der mathematischen Sprache des Stan-

Entsteht am Large Hadron Collider ein Higgs-Teilchen, zerfällt es sofort in zahlreiche andere Partikel. Ihre Spuren können Forscher unter anderem mit Hilfe des haushohen CMS-Detektors rekonstruieren.

dardmodells. Ihr zufolge sind nicht Elementarteilchen die grundlegenden Bausteine des Kosmos, sondern ihnen entsprechende Energiefelder. Das Higgs-Teilchen ist demnach nicht mehr als eine kurzlebige Anregung des omnipräsenten Higgs-Felds.

Quantenfelder sind jedoch nie völlig statisch, sondern werden dauernd von winzigen Schwankungen erfasst. Diese Fluktuationen gehen auf Teilchen-Antiteilchen-Paare zurück, die überall im Mikrokosmos ständig entstehen und sich nach Sekundenbruchteilen wieder auslöschen. Physiker sprechen von »virtuellen« Teilchen. Ihre Existenz ist eine kuriose Konsequenz der heisenbergschen Unschärferelation. Sie lässt zu, dass sich Teilchen Energie aus dem Vakuum leihen, sofern sie diese nach kurzer Zeit wieder zurückgeben.

Die virtuellen Partikel selbst kann man praktisch nicht messen, aber ihr Echo: Die geisterhaften Teilchen-Antiteilchen-Paare treten während ihrer kurzen Existenz mit langlebigen Partikeln – beziehungsweise deren Feldern – in Kontakt. Das verändert sämtliche Begegnungen im Mikrokosmos. Das Higgs-Feld ist dabei besonders empfindlich gegenüber Vakuumfluktuationen. Schließlich verleiht es fast allen anderen Elementarteilchen ihre (Ruhe-)Masse, wodurch es auch mit den virtuellen Partikeln der allermeisten Quantenfelder in Kontakt tritt.

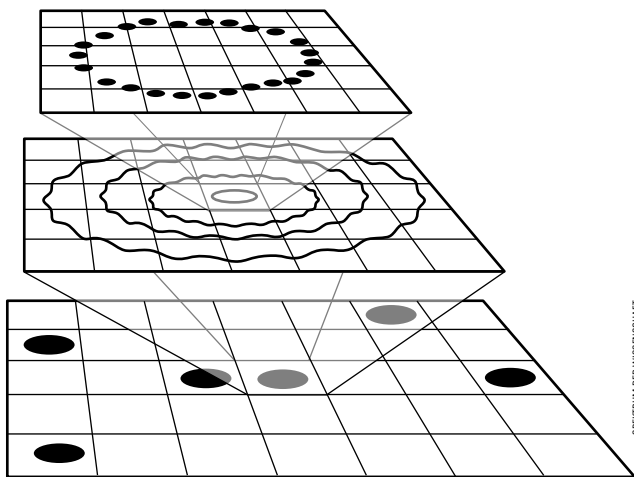
Wie die »Vakuumkorrekturen« genau ausfallen, können Forscher ausrechnen. Bereits in den 1940er Jahren, als sie eine Quantenschreibweise der Elektrodynamik entwickelten, stießen Physiker jedoch auf ein Problem. Die Experten

mussten damals klären, wie ein einzelnes Elektron in einem Magnetfeld von virtuellen Partikeln beeinflusst wird – auch von solchen, die in minimaler Entfernung vom Elektron auftauchen. Das führte jedoch zu einem Widerspruch: Je mehr man sich dem Elektron näherte, desto mehr virtuelle Teilchen kamen ins Spiel. Ihr Einfluss schien damit ins Unendliche zu wachsen – aber kein Messwert in der Physik kann unendlich groß sein.

Shin'ichirō Tomonaga, Julian Schwinger und Richard Feynman entwickelten einen Kniff, mit dem sich die Gefahr umschiffen lässt: Die Physiker klammerten alle problematischen Rechterme aus, indem sie sie in die Definition von Masse und Ladung aufnahmen. Dank dieser »Renormierung« erhielten sie eine Vorhersage für das magnetische Moment von Elektronen, die mit Präzisionsmessungen übereinstimmte.

Es war ein Rechenrick, der vielen Physikern nicht so recht behagte, jedoch alternativlos erschien. Im Jahr 1971 gelang es dem US-Physiker und späteren Nobelpreisträger Kenneth Wilson, das Verfahren zu verfeinern. Er suchte nach einer Methode, mit der man physikalische Systeme beschreiben kann (siehe **Spektrum** Oktober 1979, S. 66), die aus winzig kleinen Bausteinen bestehen, welche jedoch in bestimmten Situationen großen Einfluss auf das makroskopische Verhalten haben können. In der Natur bilden solche Systeme die Ausnahme: Normalerweise beeinflussen sich Ereignisse auf verschiedenen Größenskalen so gut wie gar nicht. So kann man das Verhalten einer Welle im Meer beschreiben, ohne dabei die molekulare Struktur der Flüssigkeit zu berücksichtigen.

Wenn man Wasser 218 Atmosphärendrücken und 374 Grad Celsius aussetzt, verschwimmt allerdings der Unterschied zwischen Flüssigkeit und Dampf. An diesem »kritischen Punkt« bilden sich Bläschen, die mal nur so groß wie ein Molekül sind, mal auf das Volumen eines ganzen Kochtopfs anwachsen können; der Mathematik zufolge können die Fluktuationen sogar unendlich groß sein.



Je näher man an etwas heranzoomt, desto mehr Details zeigen sich. Das Prinzip der Natürlichkeit besagt, dass man die Prozesse auf unterschiedlichen Größenskalen unabhängig voneinander betrachten kann.

AUF EINEN BLICK UNERTRÄGLICHE LEICHTIGKEIT

- 1** Die Entdeckung des Higgs-Teilchens hat der Physik ein großes konzeptionelles Problem beschert: Eigentlich müsste das berühmte Teilchen eine sehr viel größere Masse haben.
- 2** Energiefluktuationen aus dem Vakuum müssten das berühmte Teilchen viel schwerer machen. Mit seiner tatsächlich gemessenen Masse ist es aus Sicht vieler Physiker hochgradig »unnatürlich«.
- 3** Denkbar ist, dass ein bisher unbekannter Mechanismus die Higgs-Masse kleinhält. Vielleicht brauchen die Forscher aber auch neue mathematische Konzepte, um den Mikrokosmos zu beschreiben.

Wie sollte man damit umgehen? Im Grunde müsste man die Bläschen auf allen Größenordnungen im Blick behalten, aber das wäre selbst mit Computern zu aufwändig. Klassische Näherungsverfahren, wie Wilson sie zur Verfügung hatte, lieferten dagegen unbefriedigende Ergebnisse. Das Problem war auch deshalb relevant, weil sich etwas Ähnliches in Ferromagneten zeigte: Sie sind nur unterhalb einer charakteristischen Temperatur magnetisch. Ausschlaggebend ist hier der Spin der Elektronen, also eine mikroskopische Eigenschaft – die aber großen Einfluss auf die Magnetisierung des gesamten Körpers hat.

Wilson entwickelte ein unersetzliches Werkzeug bei der Beschreibung des Mikrokosmos

Der Amerikaner entwickelte schließlich eine elegante Strategie für solche Situationen: Als Beobachter entfernt man sich Schritt für Schritt von dem System, das man beschreiben will. Die räumliche Auflösung wird dadurch laufend geringer, wodurch Details wie die molekulare Struktur von Wasser oder die Spins der Elektronen nach und nach verschwinden.

Bei jedem dieser Zoomschritte notiert man, wie sich die Parameter des Systems verändern. Als Nächstes konstruiert man ein vereinfachtes, »renormiertes« Model mit weniger Tiefenschärfe, das zur Basis des nächsten Zoomschritts wird. Auf diese Weise verlieren Systeme, die sich über viele Größenordnungen erstrecken, plötzlich ihren Schrecken. Und vor allem erkennt man, welche Parameter über viele Größenordnungen hinweg relevant bleiben. Meist sind das nur sehr wenige, bei kritischem Wasser beispielsweise die Stärke der Wechselwirkungsenergie zwischen zwei Molekülen sowie die Temperatur. Generell kann man verschiedene Skalen mit Wilsons Verfahren aber getrennt betrachten und mit jeweils eigenen Gleichungen beschreiben.

Heute bezeichnen Experten die Technik als »Renormierungsgruppe« – und betrachten sie als unersetzliches Werkzeug bei der Beschreibung des Mikrokosmos. Denn

es hat sich gezeigt: Mit ihr lässt sich nicht nur die elektromagnetische Kraft deutlich eleganter renormieren, als das Feynman und Kollegen in den 1940er Jahren gelungen war. Physiker bekamen auch den Einfluss der Vakuumfluktuationen auf die schwache und die starke Kernkraft in den Griff.

Konkret konstruierten sie »effektive« Quantenfeldtheorien für jede der Wechselwirkungen. Sie gelten jeweils nur bis zu einem bestimmten Minimalabstand zwischen Teilchen beziehungsweise bis zu einer bestimmten kleinsten Größenordnung. Dank der Renormierungsgruppen-Technik fließen die relevanten Beiträge kleinerer Skalen dennoch mit ein, große Verfälschungen durch besonders energiereiche virtuelle Teilchen kleinerer Größenordnungen klammert man damit aber aus.

Λ markiert in Wilsons Formalismus die Grenze, ab der die Formeln einer effektiven Theorie nicht mehr gültig sind. Das griechische Symbol steht für die größtmögliche Energie, die sich virtuelle Teilchen aus dem Vakuum borgen können. Die Energie ist in der Teilchenphysik generell ein Maß für die Größenordnung beziehungsweise die Reichweite der Kräfte zwischen Teilchen; je größer die Energie, mit der Teilchen in Beschleunigern kollidieren, desto näher kommen sie sich (siehe »Die Grenzen des Messbaren«, rechts).

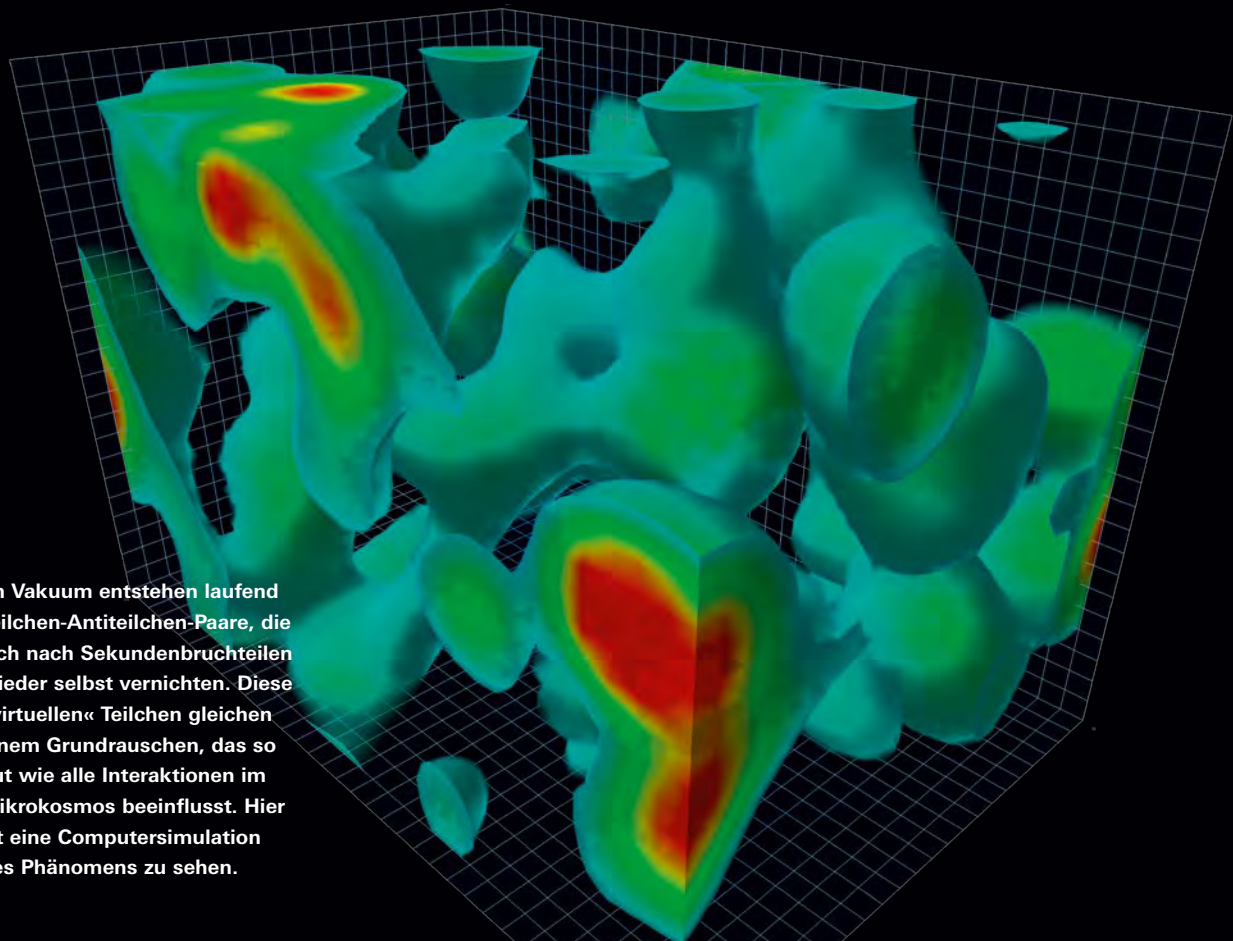
Bei der Renormierung der Wechselwirkungen im Standardmodell wurde deutlich, dass sich die Stärke der drei Grundkräfte mit dem Abstand verändert (siehe Grafik

S. 30). Daneben verändern die virtuellen Teilchen die Massen der langlebigen Partikel, und zwar um einen Wert, der von Λ abhängt. Das ist in der Regel unproblematisch, denn bei den allermeisten Teilchen fließt der Wert von Λ nur in logarithmischer Form ein. Anschaulich gesprochen: Selbst wenn sich ein virtuelles Teilchen viel Energie aus dem Vakuum leiht, bleibt der Einfluss auf die Masse des Teilchens überschaubar.

Wilson's Verfahren hatte auch in der Festkörperphysik überwältigenden Erfolg. Insgesamt hat es die Physiker in dem Glauben bestärkt, dass die Natur »emergent« ist: Demnach sollte es möglich sein, die bei großen Abständen gültigen Naturgesetze aus denen kleinerer Distanzen herzuleiten. Aus der Dynamik der Quarks sollten also im Prinzip die Eigenschaften von Protonen hervorgehen, daraus wiederum die von Atomkernen, daraus die von ganzen Atomen – und schließlich lässt sich mit Chemie und Thermodynamik die Brücke zu makroskopischen Phänomenen schlagen.

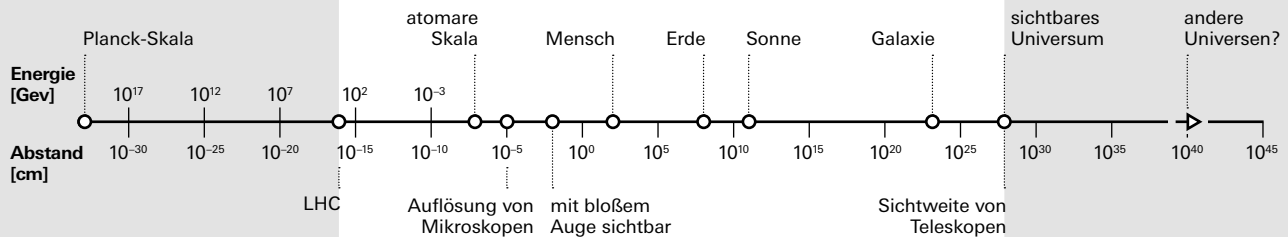
Andererseits spielen die Prozesse auf kleineren Skalen keine große Rolle mehr, wenn man aus dem Mikrokosmos herauszoomt – und hier kommt das ins Spiel, was Physiker »Natürlichkeit« nennen. Ein Modell gilt nach Auffassung der meisten Physiker dann als natürlich, wenn die Abläufe auf einer bestimmten Skala nicht allzu empfindlich auf das reagieren, was bei viel kleineren Abständen vor sich geht. »Wenn ich beschreiben will, wie sich der Mond um

Im Vakuum entstehen laufend Teilchen-Antiteilchen-Paare, die sich nach Sekundenbruchteilen wieder selbst vernichten. Diese »virtuellen« Teilchen gleichen einem Grundrauschen, das so gut wie alle Interaktionen im Mikrokosmos beeinflusst. Hier ist eine Computersimulation des Phänomens zu sehen.



Die Grenzen des Messbaren

Menschen können die Natur auf vielen Größenordnungen erforschen (weißer Bereich): Mit Teleskopen schauen sie weit ins Weltall hinaus. Und mit Teilchenbeschleunigern feuern sie Atomkerne mit vielen Gigaelektronvolt (GeV) aufeinander, wodurch sie die Interaktionen der Materie bei winzigen Abständen erforschen können. Viele Theorien der modernen Physik spielen sich aber auf unerreichbaren Skalen ab (grauer Bereich).



die Erde dreht, muss ich nicht im Detail wissen, wie Quarks in Atomkernen zusammenspielen«, sagt der Physiker Michael Krämer von der RWTH Aachen. Dieser Gedanke, dass weit entfernte Größenordnungen voneinander »entkoppelt« sind, ziehe sich durch die gesamte Physik.

Tatsächlich haben Thomas W. Appelquist und James J. Carazzone 1975 sogar ein Theorem bewiesen, das diese Einsicht für wilsonsche Quantenfeldtheorien zur Gesetzmäßigkeit erhebt. An und für sich steht das Standardmodell in überwältigendem Einklang mit der Forderung nach Natürlichkeit: Wenn man den Mikrokosmos als Stapel übereinandergeschichteter, effektiver Quantenfeldtheorien begreift, beschreibt das Regelwerk fast alle bisher beobachteten Begegnungen zwischen Elementarteilchen mit beeindruckender Präzision.

Beim Higgs-Teilchen liefert Wilsons Renormierung ein kurioses Ergebnis

Aber ausgerechnet beim Higgs-Teilchen, dem krönenden Abschluss des Standardmodells, führt Wilsons Renormierungsverfahren zu einem kuriosen Widerspruch. Hier hängt die Größe der erlaubten Vakuumkorrekturen, die auf die Masse einwirken, nicht vom Logarithmus von Λ ab, sondern von Λ^2 , wie die entsprechende Herleitung zeigt. Virtuelle Teilchen, die sich viel Energie aus dem Vakuum leihen, sollten daher die Masse des berühmten Partikels viel stärker nach oben treiben als bei anderen Teilchen. Sie müssten das Higgs eigentlich so schwer machen, dass es am LHC gar nicht erst auftauchen dürfte – was im Vorfeld der Experimente an dem Genfer Beschleuniger auch eine viel diskutierte Möglichkeit war.

Die Entdeckung im Jahr 2012 machte dann jedoch klar: Das Higgs bringt 125 Gigaelektronvolt (GeV) auf die Waage – das entspricht der Masse von 133 Wasserstoffatomen. Die nach Wilsons Renormierungsgruppe zulässigen Quantenkorrekturen müssten ihm jedoch eigentlich eine Masse zwischen 100 000 000 und 1 000 000 000 000 000 000 GeV geben.

Wie groß die Diskrepanz genau ist, hängt davon ab, bis zu welcher Minimallänge (beziehungsweise Maximalenergie) das Standardmodell gültig ist. Das weiß bisher niemand. Nicht wenige Physiker halten es jedoch für möglich, dass ihr Regelwerk den Mikrokosmos bis zur winzigsten aller Größenordnungen korrekt beschreibt, der so genannten Planck-Skala bei 10^{-35} Metern. Spätestens bei diesem Abstand müsste auch die Gravitationskraft so stark wie die Quantenkräfte werden, vermuten Forscher. Das spräche dann dafür, dass die in Gigaelektronvolt ausgedrückte Higgs-Masse 19 Stellen haben sollte und nicht nur drei.

Aber wieso hat sie in Wahrheit nur einen winzigen Bruchteil des Werts, den Wilsons Formalismus nahelegt? Einige Physiker glauben, dass einfach nicht jede Facette der Quantenfeldtheorie eine Entsprechung in der Wirklichkeit findet. Real ist schließlich nur das, was in Messungen auftaucht, in diesem Fall also die gemessene Higgs-Masse. Warum sollte man sich zu viele Gedanken über etwas machen, was man gar nicht beobachten kann?

Diese Haltung lässt allerdings die Frage offen, warum Quantenkorrekturen überall sonst einen messbaren Einfluss haben, nur beim Higgs-Teilchen nicht. Die meisten Forscher favorisieren daher eine andere, deutlich spannendere Erklärung: Etwas gleicht die Energieschwankungen des Vakuums, die in der Quantenfeldtheorie auftauchen, zielgenau aus – und sorgt damit dafür, dass das Higgs-Feld die am LHC gemessenen Eigenschaften hat.

Doch was könnte das sein? Und wieso kompensiert es die Fluktuationen dann gerade so, dass die Higgs-Masse in den Bereich fällt, in dem auch sämtliche anderen bekannten Teilchen und Felder liegen? Warum ist das Teilchen nicht 1000-mal oder eine Million Mal so schwer?

Für den Großteil der Experten ist diese »Feinabstimmung« (englisch: finetuning) entweder ein riesiger Zufall, in etwa so wahrscheinlich wie ein Bleistift von der Länge unseres Sonnensystems, der für alle Ewigkeit auf seiner einen Millimeter breiten Spitze balanciert. Oder aber die

Higgs-Masse ist ein Hinweis auf bisher unbekannte Naturgesetze. In jedem Fall verstößt das Standardmodell damit ganz erheblich gegen das Natürlichkeitsprinzip: Der genaue Wert der Higgs-Masse scheint sehr empfindlich von etwas abzuhängen, was auf einer viel kleineren, weit entfernten Größenordnung stattfindet.

In den vergangenen 40 Jahren hat es nicht an eleganten Ideen zur Lösung des Problems gemangelt. Ende der 1970er Jahre schlug Leonard Susskind eine Theorie namens »Technicolor« vor, die das Standardmodell ab Abständen von 10^{-19} Metern, wie sie der LHC erreicht, ablösen sollte. Ihr zufolge ist das Higgs-Teilchen aus mehreren quarkähnlichen Teilchen zusammengesetzt, welche die Masse des berühmten Partikels gegenüber Einflüssen von Vakuumkorrekturen auf kleineren Abständen abschirmen würden.

Auch die »Supersymmetrie« fand viele Anhänger, weil sie die Natürlichkeit des Standardmodells wiederherstellen würde. Das Theoriegebäude sieht zu jedem bekannten Elementarteilchen einen bisher unbekanntem Partner vor. Diese Spiegelbilder würden ganz eigene Vakuumfluktuationen im Higgs-Feld auslösen, die jene der bekannten Teilchen gerade kompensieren. Die Vakuumfluktuationen sollten damit nicht mehr nennenswert zur Masse des Higgs beitragen.

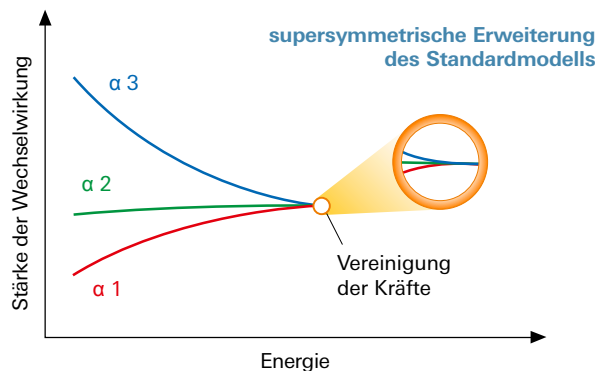
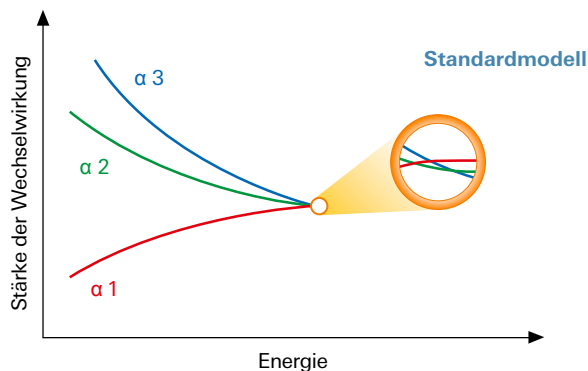
Ein netter Nebeneffekt: Die zusätzlichen virtuellen Teilchen würden die Stärke der Wechselwirkung bei kleinen Größenordnungen gerade so verändern, dass diese bei winzigen Abständen gleich stark sind (siehe Grafik rechts). Die Vorhersage galt lange als wichtiger Hinweis darauf, dass auf der kleinsten aller Größenordnungen eine »Theorie von allem« oder Weltformel gilt, die auch die Gravitation umfasst und aus der sich alle bekannten Naturgesetze ableiten lassen.

Am LHC sind allerdings bisher weder Hinweise auf die Technicolor noch auf supersymmetrische Partnerteilchen aufgetaucht. Die Technicolor ist dadurch aus Sicht der meisten Forscher so gut wie ausgeschlossen. Der Gedanke einer Supersymmetrie ist zwar so weit gefasst, dass hier noch Varianten denkbar sind. Für viele Wissenschaftler sind sie aber nicht mehr so reizvoll, wie es die bereits falsifizierten Varianten waren.

Das Morgengrauen der Nach-Natürlichkeits-Ära

Momentan sieht das Standardmodell also herzlich unnatürlich aus – und eine Lösung ist nicht in Sicht. Gian Francesco Giudice, der führende theoretische Physiker des CERN und damit eine der größten Autoritäten der Teilchenphysikergemeinschaft, rief 2017 in einem Aufsatz sogar das »Morgengrauen der Nach-Natürlichkeits-Ära« aus. Für viele Experten kam das einer Zeitenwende gleich. Nun streiten sie: Sollte man nach einem anderen Kitt à la Supersymmetrie suchen, um die Natürlichkeit doch noch zu retten? Oder haben die Natur und die Physiker einfach unterschiedliche Vorstellungen davon, was natürlich ist?

Die eingangs erwähnte Konferenz in Aachen sollte Fortschritte in diesen Fragen bringen. Sie war der erste von mehreren Workshops eines interdisziplinären DFG-Projekts namens LHC Epistemology, in dem Physiker gemeinsam mit Philosophen auf den Erkenntnisgewinn



- $\alpha 3$ = starke Wechselwirkung
- $\alpha 2$ = schwache Wechselwirkung
- $\alpha 1$ = Elektromagnetismus

Wenn man Atomkerne mit höherer Energie aufeinanderfeuert, verändert sich die Stärke der Kräfte, die zwischen Materiebausteinen wirken. Laut Supersymmetrie müssten drei der Wechselwirkungen ab einer gewissen Energie gleich stark werden.

am LHC blicken und den sich abzeichnenden Wandel der Teilchenphysik analysieren wollen (siehe **Spektrum** August 2017, S. 19). Bei den Diskussionen auf der Konferenz wurde deutlich, wie orientierungslos die Wissenschaftler momentan sind – und wie weit die Meinungen auseinandergehen. »Ich bin die ganze Zeit hin- und hergerissen, wie groß das Problem wirklich ist«, sagte etwa Holger Gies nach seinem Vortrag.

Andere Teilnehmer vertraten klarere Standpunkte. Einige argumentierten, dass die Teilchenphysik im Grunde gar kein Problem hat, zumindest noch nicht. Das bisherige Ausbleiben supersymmetrischer Partikel sage wenig darüber aus, wie wahrscheinlich die verbliebenen Varianten der Supersymmetrie seien, argumentierte etwa der US-amerikanische Physiker James Wells von der University of Michigan. »Die Supersymmetrie könnte das Natürlichkeitsproblem nach wie vor mindern«, sagt er. Man solle die Lage also bitte nicht überdramatisieren und abwarten.

Allerdings können die noch nicht ausgeschlossenen Varianten der Supersymmetrie die Vakuumkorrekturen nicht mehr punktgenau aufheben. Die neuen Partikel, sofern es sie wirklich gibt, müssen deutlich schwerer als die bekannten Materiebausteine sein – sonst wären sie ja am LHC oder an anderen Teilchenbeschleunigern aufge-

taucht. Damit bleibt aber in jedem Fall ein Unterschied von ein paar Größenordnungen zwischen Erwartung und Messung der Higgs-Masse. Physiker wie Wells könnten damit wohl leben. Andere Forscher sehen hier jedoch eine zentrale Schwäche des Natürlichkeitsarguments: Wie weit dürfen sich gegenseitig beeinflussende Größenordnungen in einer Theorie auseinanderliegen, damit sie noch natürlich ist? Ist der Faktor 1000 in Ordnung? Oder wird ein Modell erst ab vier oder mehr Größenordnungen unnatürlich?

Die Entdeckung der Unnatürlichkeit

Wirklich einig sind sich die Physiker in dieser Frage nicht. Manchem dürfte noch die Aussage des einflussreichen US-Physikers Nima Arkani-Hamed in den Ohren klingen, der 2013 den Spruch prägte, eine Theorie könne genauso wenig ein »bisschen feinabgestimmt« sein, wie jemand nur ein »bisschen schwanger« sei.

Arkani-Hamed und andere Forscher sind nach der Entdeckung des Higgs-Teilchens dazu übergegangen, Erweiterungen des Standardmodells zu entwerfen, die bewusst »unnatürlich« sind, also gar nicht mehr versuchen, die Vakuumkorrekturen aus der Quantenfeldtheorie zu kompensieren. »Vor einigen Jahren hätte man solche Aufsätze noch nicht wirklich ernst genommen, nun ziehen sie viel Aufmerksamkeit auf sich«, sagt Michael Krämer.

Cheftheoretiker Giudice hat sich dafür stark gemacht, nicht mehr ganz so viel Wert auf das Natürlichkeitsprinzip zu legen, es aber auch nicht völlig aus den Augen zu verlieren. Vor den LHC-Experimenten gehörte er noch zu jenen, die den unschönen Makel des Standardmodells unbedingt beseitigen wollten. »Wir sehen uns mit einer Situation konfrontiert, in der wir unsere Leitmotive überdenken müssen«, schreibt er nun. Letztlich seien Phasen der Neuorientierung fester Teil der Wissenschaft und nicht zwangsläufig etwas Schlechtes. In der Vergangenheit gingen sie oft einem Paradigmenwechsel voraus. »Uns fehlt heute einfach die historische Perspektive, um durch den Nebel der gegenwärtigen Verwirrung hindurchzuschauen.«

Das kann man für optimistisch halten. Für Sabine Hossenfelder vom Frankfurt Institute for Advanced Studies zeigt die aktuelle Situation, dass sich die Physiker jahrzehntelang in die Tasche gelogen haben: »Das Natürlichkeitsargument war von vornherein unsinnig«, sagt sie. Es habe sich in erster Linie um eine Mode gehandelt, die lange nicht hinterfragt wurde. »Dass die Higgs-Masse eine Erklärung braucht, ist eher ein Gefühl als ein Fakt.«

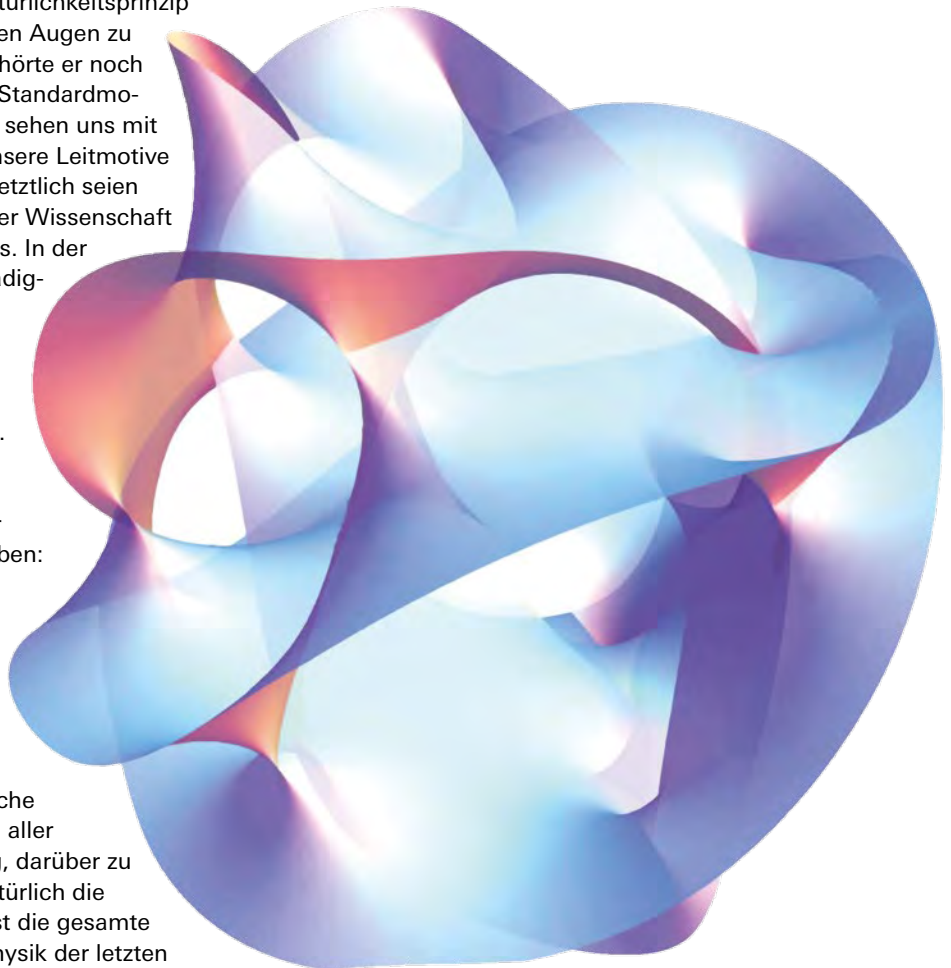
Da man schlichtweg nicht wisse, welche physikalischen Gesetze auf der kleinsten aller Größenordnungen gelten, sei es hinfällig, darüber zu spekulieren, wie wahrscheinlich oder natürlich die heute gemessene Higgs-Masse sei. »Fast die gesamte Theorieentwicklung in der Grundlagenphysik der letzten

30 Jahre basiert daher auf einem logischen Fehlschluss«, sagt die Frankfurterin.

Arthur Hebecker sieht das anders. Das Natürlichkeitsargument habe zu Recht eine große Bedeutung gehabt, sagt der Stringtheoretiker von der Universität Heidelberg. Aus seiner Sicht sollte es auch künftig eine Rolle bei der Suche nach neuer Physik spielen. »Es ist zu früh, um zu sagen, die Welt ist nicht natürlich.« So müsse man in jedem Fall die weiteren Daten des LHC abwarten. Dieser wird bis mindestens in die 2020er Jahre hinein weiter Atomkerne kollidieren lassen und kann so vielleicht doch noch Abweichungen vom Standardmodell aufspüren.

Hebecker und andere Stringtheoretiker diskutieren seit Längerem eine spektakuläre wie spekulative Lösung für das Natürlichkeitsproblem: Im Urknall könnte nicht nur unser Universum entstanden sein, sondern unvorstellbar viele Welten. Welten, in denen jeweils andere Naturgesetze gelten. So sieht es zumindest das bereits in den 1980er Jahren entwickelte Konzept der »ewigen Inflation«

Laut Stringtheorie besteht die Realität aus zehn Dimensionen, von denen jedoch sechs aufgerollt und damit »unsichtbar« sind. Mit so genannten Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten können Physiker ausloten, auf wie viele Arten sich die Extra-dimensionen verknoten ließen.



JEBURJAI (COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:CALABI_YAU.JPG) / PUBLIC DOMAIN

vor. Demnach ploppen laufend neue Universen aus dem Nichts auf, die sich zügig voneinander entfernen – wie Luftblasen in einem Wasserglas, in das jemand eine Brausetablette geworfen hat.

Seit 15 Jahren erhält dieser Gedanke Auftrieb durch die Stringtheorie, die eine schier grenzenlose Landschaft von rund 10^{500} möglichen Raumzeit-Geometrien mit jeweils eigenen Naturgesetzen vorhersagt – das legen zumindest grobe Abschätzungen nahe. Bislang ist es den Forschern jedoch nicht gelungen, unter all diesen mutmaßlichen Welten diejenige zu finden, in der wir leben, weshalb mancher Wissenschaftler den Bezug der Stringtheorie zur Realität anzweifelt.

Sollten wir tatsächlich in einem »Multiversum« leben, würde sich das Natürlichkeitsproblem in Luft auflösen: Dann wäre unser Universum gerade jenes, in dem die Higgs-Masse den von uns gemessenen Wert hat. Die Notwendigkeit für einen großen kosmischen Zufall oder eine Erklärung durch neue Naturgesetze entfielen, da letztlich alle denkbaren Higgs-Massen in irgendeinem Universum verwirklicht wären. Diese »anthropische« Sichtweise ist allerdings denkbar unbeliebt. Schließlich erhält damit gewissermaßen Beliebigkeit Einzug in das Weltbild der Forscher. Auch ist derzeit offen, inwieweit man Theorien wie die Stringtheorie und die eines Multiversums experimentell testen kann.

Schon einmal hat das Natürlichkeitsargument dabei geholfen, neue Phänomene zu entdecken

Die winzigen Fäden (englisch: »strings«), aus der die Welt im Kern bestehen soll, würden erst bei der Planck-Länge von 10^{-35} Metern in Erscheinung treten. Um diese Größenordnung sichtbar zu machen, bräuchte man einen Teilchenbeschleuniger vom Ausmaß unserer Galaxie, wie Schätzungen zeigen. Und andere Universen wären längst viel zu weit von unserer Welt entfernt, als dass wir Signale von ihnen empfangen könnten. Anhänger des Konzepts sehen darin nur bedingt eine Schwäche: Kann man es einer Theorie wirklich zum Vorwurf machen, fragen sie, dass wir Menschen sie nicht ohne Weiteres überprüfen können?

»Das Multiversum läuft jedenfalls darauf hinaus, das ursprüngliche Konzept der Natürlichkeit aufzugeben«, sagt der Wissenschaftsphilosoph Porter Williams von der University of Pittsburgh. Der junge Assistenzprofessor gehört zu einer Gruppe von physikalisch geschulten Geisteswissenschaftlern, die seit einigen Jahren mit verstärktem Interesse auf die Arbeit der Teilchenphysiker blicken.

In einem Aufsatz hat er untersucht, was Physiker eigentlich meinen, wenn sie von Natürlichkeit reden. Williams zufolge haben sich hier über die Jahrzehnte mehrere teils missverständliche Deutungen etabliert. Bei genauerer Betrachtung ließen sich jedoch alle auf das Unbehagen über die Vorstellung zurückführen, dass einige physikalische Prozesse von Details bei viel kleineren Abständen beeinflusst werden. Demnach sei die Natürlichkeit auch weit mehr als eine Mode oder ein Schönheitskriterium, argumentiert er. Sie stehe vielmehr bis heute völlig zu Recht im Zentrum der Teilchenphysik: »Ich halte es für

zwingend, sie als ein ernsthaftes physikalisches Problem zu betrachten, nach dessen Lösung man suchen sollte.«

So gebe es in der Geschichte der Disziplin mehrere Beispiele dafür, wie scheinbar unnatürliche Zusammenhänge zwischen verschiedenen Größenordnungen Hinweise auf neue Naturphänomene enthielten, zumindest in der Rückschau. Und einmal diene die Natürlichkeit sogar dazu, eine Eigenschaft der Natur vorherzusagen.

Bevor 1974 das Charm-Quark entdeckt wurde, fiel Physikern bereits auf, dass die Massen von zwei Typen von Kaonen (aus Quarks zusammengesetzte Teilchen des Standardmodells) sehr viel näher beieinanderliegen, als die hier gültige effektive Quantenfeldtheorie vorhersagte. Mary K. Gaillard und Benjamin W. Lee argumentierten damals, dass die Wechselwirkung mit einer zusätzlichen Quarkvariante mit einer Masse von rund 1,5 Gigaelektronvolt den Messwert auf den unnatürlich kleinen Wert drücken könnte. Sie kamen damit der Realität sehr nahe, wie sich wenig später zeigte: Das Charm-Quark hat eine Masse von knapp 1,3 GeV, und es liefert eine elegante Erklärung für die Massendifferenz der Kaonen.

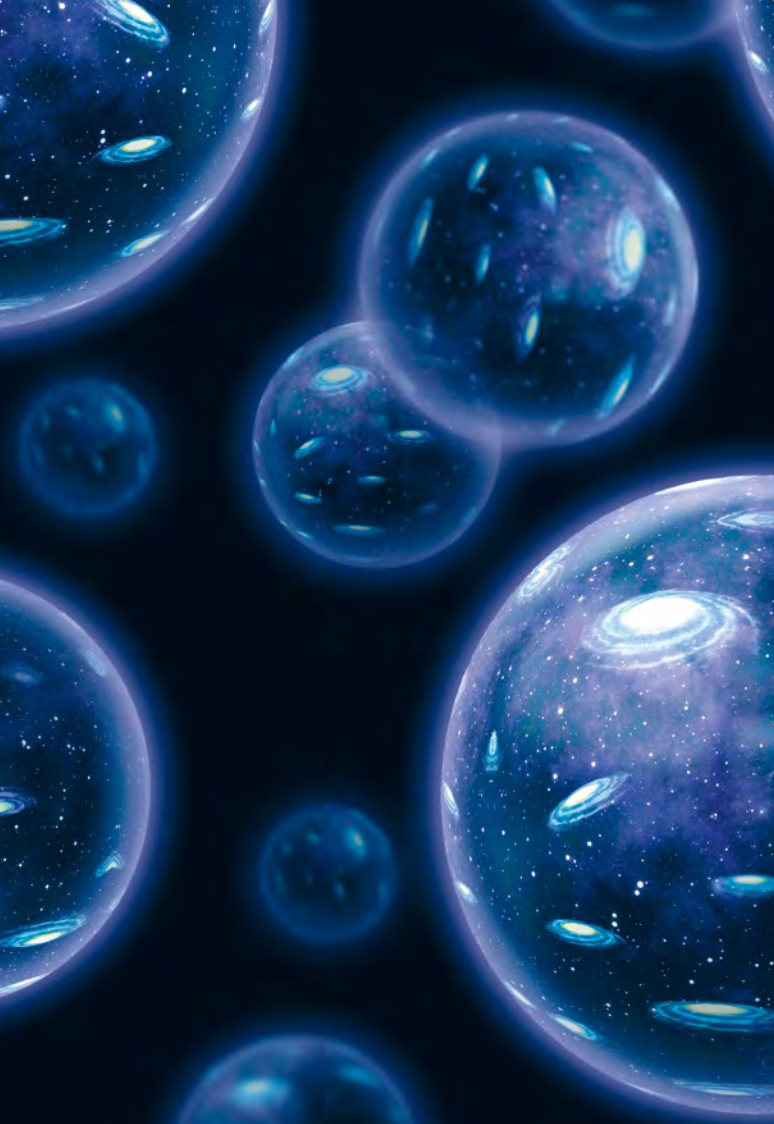
Williams hat sich bei seiner wissenschaftlichen Recherche auch darüber gewundert, wie unkritisch Physiker dem mathematischen Formalismus des Standardmodells vertrauen. Das könnte sie blind dafür machen, dass man nun neue Kniffe bei der Beschreibung des Mikrokosmos braucht, gibt der Wissenschaftsphilosoph zu bedenken: »Das Natürlichkeitsproblem ist womöglich nur eine Eigentümlichkeit von effektiven Feldtheorien.«

In ein ähnliches Horn bläst sein Kollege Alexei Grinbaum vom Kernforschungszentrum CEA in Saclay bei Paris. »Es könnte ein Signal sein, dass wir uns nach anderen mathematischen Werkzeugen umschauen sollten.« Soll heißen: Die rätselhaften Vakuumkorrekturen, welche die Masse des Higgs-Teilchens in absurde Höhen treiben sollten, könnten nicht mehr als mathematischer Abfall ohne Bezug zur Wirklichkeit sein.

Noch bis vor wenigen Jahren reagierten viele Physiker allergisch auf solche Einwände. Sie gingen in erster Linie darauf zurück, spotteten sie, dass jemand die Renormierung nicht richtig verstehe. Seit der Entdeckung des Higgs-Teilchens und dem Ausbleiben von Belegen für die Supersymmetrie sind solche Zweifel jedoch salonfähig geworden. »Vielleicht haben wir den Punkt erreicht, an dem unser Bild der Natur als Haufen effektiver Feldtheorien zusammenbricht«, schrieb CERN-Cheftheoretiker Giudice nach der Entdeckung des Higgs-Teilchens.

Provokanter formulierte es jüngst der angesehene und für klare Worte bekannte Teilchenphysik-Blogger Adam Falkowski: Die Quantenfeldtheorie werde oft ähnlich gelehrt wie Magie in Hogwarts, dem Zauberer-Internat aus dem Harry-Potter-Universum. »Man folgt blind und stur den Anleitungen aus staubigen Büchern, ohne wirklich den Sinn oder die Bedeutung zu verstehen.«

Immerhin experimentieren Physiker wieder verstärkt mit mathematischen Konzepten, die lange eher in der Abstellkammer lagen, etwa einem Formalismus namens S-Matrix, der in den 1940er Jahren von Werner Heisenberg mitentwickelt wurde. Andere Forscher versuchen, Quan-



FOTODISC / GETTY IMAGES / ISTOCK

**Eine mögliche Lösung für das Natürlichkeitsproblem:
Gibt es neben unserem noch unzählige andere
Universen mit jeweils eigenen Naturgesetzen?**

tenfeldtheorien zu entwickeln, die nicht mehr auf die wilsonsche Renormierung angewiesen sind und in denen es völlig normal ist, wenn sich physikalische Prozesse über viele Skalen hinweg beeinflussen.

Über all dem schwebt die Hoffnung, die Natürlichkeit doch noch zu retten – also physikalische Mechanismen zu finden, mit denen das Universum Vakuumfluktuationen im Higgs-Feld unterdrückt. Und dafür mangelt es nicht an Ideen. Ein beliebtes Modell sieht beispielsweise vor, dass es nach dem Urknall ein weiteres unsichtbares Energiefeld gab, das direkt mit dem Higgs-Feld in Wechselwirkung trat. Dieses Relaxonen-Feld könnte anfangs wild hin und her gesprungen sein und hätte das Higgs-Feld dann auf den Wert gedrückt, den wir heute sehen, spekulierte ein Team um Peter W. Graham von der Stanford University 2015.

Holger Gies und andere Forscher versuchen dagegen eine Quantenfeldtheorie zu entwickeln, die auch die Schwerkraft mit einbindet. Eigentlich scheitern bei Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie bislang sämtliche Versuche einer Renormierung. Das ist formell einer der

Hauptgründe, warum die Suche nach einer Theorie von allem so schwierig ist. Theorien mit der Eigenschaft der »asymptotischen Sicherheit« umschiffen dieses Problem und könnten sich langfristig vielleicht zu einer Alternative zur Stringtheorie mausern. »Die Natürlichkeit wird so hart angegriffen, dass ich stark versucht bin, sie zu verteidigen«, sagte Gies zu seinen Kollegen in Aachen. »Wir schaffen es doch sicher, ein Modell zu bauen, das die bestehenden Probleme löst, oder?«

Wenn die Geschichte ein Indikator für die Zukunft ist, ist dies die Zeit, in der ein kühner Gedanke den Durchbruch bringt. Wer weiß, vielleicht ist es ja der, den der emeritierte Professor Fred Jegerlehner von der Humboldt-Universität zu Berlin auf der Tagung präsentierte und der in ähnlicher Form seit Jahren durch die Gelehrtenzimmer geistert.

Ein Phasenübergang am Anbeginn der Zeit

Demnach hätte das Higgs-Feld direkt nach dem Urknall, als Materie für einen Sekundenbruchteil so dicht zusammengeballt war, dass die Gesetze der Planck-Skala galten, ein eigentümliches Verhalten an den Tag gelegt: Dank der gewaltigen Energie aus dem Vakuum trieb es zunächst eine explosionsartige, wenige Sekundenbruchteile währende Expansion des Kosmos voran, die so genannte Inflation. Anschließend durchlief es einen Phasenübergang und fiel dadurch auf seinen heutigen Wert. In diesem Fall entfielen die Notwendigkeit für neue Teilchen oder Felder. Das Natürlichkeitsproblem wäre gar kein Problem, sondern ein Hinweis auf die Lösung – und das ganz ohne das unliebsame Multiversum.

Für manchen Besucher der Aachener Konferenz war das ein Vorschlag, der zu schön wirkte, um wahr zu sein. Aber niemand bestritt, dass Jegerlehner einen wichtigen Punkt berührte, der direkt verknüpft sein könnte mit der gegenwärtigen Krise: In der Kosmologie gibt es ebenfalls ein Natürlichkeitsproblem. Dort weicht die Expansionsgeschwindigkeit des Weltalls nicht bloß um ein gutes Dutzend Nullen von der Erwartung ab. Sie liegt um bis zu 122 Größenordnungen unter dem Wert, den man auf Basis der Energie aus allgegenwärtigen Quantenfeldern wie dem Higgs-Feld erwarten würde. Das Symbol, mit dem die Ausdehnung des Alls in den Gleichungen der Kosmologen auftaucht, ist ausgerechnet ein Λ . Auch deshalb wird der griechische Buchstabe die Physiker wohl noch eine ganze Weile beschäftigen. ◀

QUELLEN

Giudice, G. F.: The Dawn of the Post-Naturalness Era. In: Forte, S. et al. (Hg.): From My Vast Repertoire ... Guido Altarelli's Legacy. World Scientific 2018

Graham, P. W. et al.: Cosmological Relaxation of the Electroweak Scale. In: Physical Review Letters 115, 221801, 2015

Williams, P.: Naturalness, The autonomy of scales, and the 125 GeV Higgs. In: Studies in History and Philosophy of Modern Physics 51, S. 82–96, 2015

Wilson, K. G.: Renormalization Group – Critical Phenomena and Kondo Problem. In: Review of Modern Physics 47, S. 773–840, 1975

POLARFORSCHUNG GLETSCHERSCHMELZE HEBT DIE ANTARKTIS AN

Der westantarktische Eisschild hat in den letzten Jahren zunehmend an Masse verloren. Mancherorts hebt sich das Bodenniveau dadurch rapide – was die Gletscher stabilisieren könnte.

Die Antarktis beherbergt den Großteil der Gletschermassen des Planeten. Klimaforscher befürchten, dass Teile des Eispanzers schmelzen und den Meeresspiegel ansteigen lassen könnten: um bis zu drei Meter im Lauf der nächsten Jahrhunderte. Allerdings ist noch ungewiss, wie sich die Antarktis im Zuge der globalen Erwärmung konkret verändert. Wissenschaftler versuchen daher genauer zu bestimmen, wie viel Eis in jüngster Zeit verschwunden ist und welche Prozesse den Wandel in der südlichen Polarregion antreiben.

Im Prinzip gibt es drei Methoden, mit denen Forscher die Veränderungen der antarktischen Eismasse beobachten: Die Altimetrie basiert auf Höhenmessungen mit Radar- und Lasergeräten an Bord von Satelliten. Bei der Gravimetrie macht man sich die Aufzeichnungen der von 2002 bis 2017 andauernden Satellitenmission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) zu Nutze. Das Satellitenduo registrierte Veränderungen des Schwerfelds der Erde, die unter anderem von Eisschilden hervorgerufen werden. Und für die Input-Output-Methode kombinieren Forscher Messungen mit Simulationen: Satelliten erfassen die Geschwindigkeiten von Gletschern, was es erlaubt, deren Massenverlust zu ermitteln. Den Zugewinn an Eis durch Schneefälle berechnet man anhand von Klimamodellen und zieht dann Bilanz.

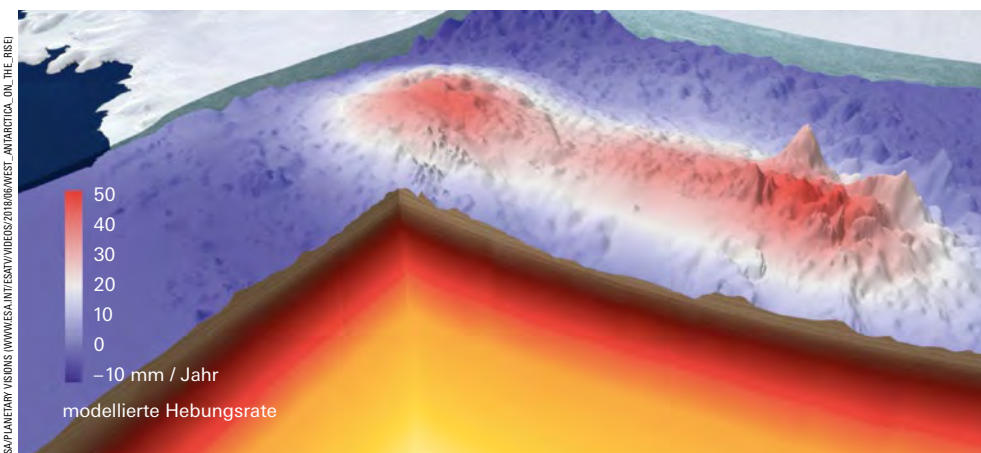
Im Rahmen einer großen Vergleichsstudie – der so genannten Ice Sheet Mass Balance Inter-Comparison Exercise (IMBIE) – suchen Forscher alle paar Jahre einen Konsens über die aktuelle Entwicklung basierend auf den Daten dieser drei Methoden. Immer Mitte Juni veröffentlichen sie dann die neuesten Zahlen. Ihrem jüngsten Bericht nach hat der Eispanzer der Antarktis von 1992 bis 2017 um 2,7 Billionen Tonnen abgenommen. Mit einem Fehler von

1,4 Billionen Tonnen ist die Unsicherheit des errechneten Eisverlusts allerdings erheblich. Die schmelzenden Gletscher nahe dem Südpol haben in den letzten 25 Jahren acht Millimeter von acht Zentimetern Anstieg des Meeresspiegels weltweit beigetragen – vielleicht aber auch vier Millimeter mehr oder weniger.

In den letzten Jahren habe sich der Eisschwund beschleunigt, berichtet die 84-köpfige Forschergruppe um Andrew Shepherd von der University of Leeds in England: Seit 2012 verlor die Antarktis pro Jahr im Schnitt 219 Milliarden Tonnen Eis. Von 2007 bis 2012 waren es »nur« 160 Milliarden Tonnen jährlich gewesen. Geschrunpft sind vor allem die Gletscher der Westantarktis und der Antarktischen Halbinsel, während sich die Eismasse der Ostantarktis wenig änderte.

Die Ergebnisse der verschiedenen Methoden zur Analyse des Gletscherschwunds klaffen teils deutlich auseinander. Daher versucht die IMBIE-Studie, durch die Vielzahl der einbezogenen Studien den Fehler zu reduzieren. Auffallend ist aber, dass für die Zeit seit 2012 nur eine einzige Studie die Input-Output-Methode verwendete, die zudem einen besonders großen Eisverlust ausweist.

IMBIE hat vor Kurzem Konkurrenz bekommen: Wissenschaftler um Jonathan Bamber von der University of Bristol veröffentlichten Mitte 2018 eine Analyse dazu, welchen Beitrag der Rückgang von Eismassen auf dem Land zum Anstieg des Meeresspiegels leistet. Ihr besonderes Augenmerk lag dabei auf einer robusten Methodik. Für die Antarktis ermittelten sie ähnlich hohe Verluste wie das IMBIE-Team. Die Region mit der größten Ungewissheit ist laut Bamber die Ostantarktis, wo schon kleine Fehler in den Höhenmessungen einen deutlichen Unterschied beim Massentrend hervorriefen.



Mit Computersimulationen berechnen die Forscher, wie sich der Untergrund in der Westantarktis hebt.



DAVID SODNER, OHIO STATE UNIVERSITY

Auf Felsen montierte GPS-Geräte liefern den Wissenschaftlern genaue Daten über die allmählichen Bewegungen der Landmassen.

Die Prozesse, die zum Eisverlust der Antarktis führen, sind im Prinzip bekannt. Meerwasser und Luft erwärmen sich, das Schelfeis, das wie ein Schutzgürtel vor den Gletschern im Meer schwimmt, schwindet, und Meeresströmungen verändern sich. In den Medien scheint die Ursache für diese Phänomene oft eindeutig: der Mensch und dessen Treibhausgasemissionen. In Wirklichkeit ist unklar, welcher Anteil der Veränderungen auf den Menschen zurückzuführen ist und welcher auf natürliche Prozesse.

Wenn Eis auf Land und Wasser trifft

Warum die Westantarktis leichter Eis verliert als die Ostantarktis, können Klimaforscher hingegen mit recht großer Sicherheit beantworten: Weite Teile des westlichen Eispanzers sitzen unterhalb des Meeresspiegels auf Land. Dadurch erhalten die Eiszungen Auftrieb und werden instabil – insbesondere wenn wärmeres Meerwasser unter das Eis vordringt. Zwei Studien liefern nun weitere Erkenntnisse zur Stabilität der Gletscher.

Bisher nahmen Wissenschaftler an, der Eisschild hätte seit der letzten Eiszeit fast durchgehend an Masse verloren. Diese Auffassung muss womöglich revidiert werden. Hinweise darauf hat ein Team um Jonathan Kingslake von der Columbia University in New York gefunden. Demnach ist der Eisschild zunächst stärker geschrumpft als gedacht, hat sich anschließend jedoch wieder ein Stück ausgedehnt. Auslöser für die Studie war eine überraschende Beobachtung: Nahe der Basis eines westantarktischen Gletschers hatten die Forscher organischen Kohlenstoff (C) mit einem unerwartet hohen Anteil an radioaktivem ^{14}C entdeckt, der auf ein junges Alter hindeutet. Die Autoren nehmen an, dass der Kohlenstoff von Mikroorganismen stammt, die im Meer leben, und dieses in der Vergangenheit bis an den Fundort heranreichte. Vermutlich befand

sich die Aufsetzlinie des betreffenden Gletschers 200 Kilometer weiter im Inneren der Westantarktis als heute. In einem anderen Gebiet des Eisschildes identifizierten die Forscher mittels Radar frühere Gletscherspalten, die inzwischen wieder mit Eis gefüllt sind. Unter den aktuell herrschenden Bedingungen – langsam vor sich hinstromende Gletscher mit einer kalten Basis – können die Spalten nicht entstanden sein. Dafür muss es deutlich wärmer gewesen sein.

Um die Beobachtungen erklären zu können, modellierte der ebenfalls an der Studie beteiligte Torsten Albrecht vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung den Eisschild und dessen Bewegungen am Computer. Der Simulation zufolge schrumpfte das Eis der Westantarktis von vor 14500 bis vor 9000 Jahren zunächst stark. Der Rückzug der Eiszungen in Richtung Südpol um mehr als 1000 Kilometer entlastete die darunterliegenden Erdkruste, die sich daraufhin an hob. Eine solche glazial-isostatische Ausgleichsbewegung ist typisch für Landmassen, die von Gletschereis befreit wurden. Durch die Hebung wich das Meer zurück. Das stabilisierte die Gletscher, die nun wieder wachsen konnten.

Angesichts des immensen Eisverlusts der Westantarktis in den letzten Jahren könnte man in der Ausgleichsbewegung eine Art natürliche Rettung sehen. Die Autoren der Studie erteilen dieser Hoffnung aber eine Absage: Das Aufsteigen der Erdkruste in den von ihnen untersuchten Gebieten laufe zu langsam ab, als dass es dem rapiden Gletscherschwund rechtzeitig entgegenwirken würde.

In anderen Teilen der Westantarktis könnte der Mechanismus aber vielleicht tatsächlich zur Stabilisierung beitragen. Am Rand der Amundsensee hat ein Team um Valentina Barletta von der Technical University of Denmark erstmals Messungen der Landhebung vorgenommen, indem sie GPS-Geräte auf Felsen montierten, die aus dem Eis herausragten. Barletta und ihre Kollegen ermittelten so ein Aufsteigen um bis zu 41 Millimeter pro Jahr – deutlich mehr, als sie erwartet hatten. Es ist eine der höchsten Hebungsraten, die Wissenschaftler je in einem verglichenen Gebiet auf der Erde gemessen haben.

Die Geschwindigkeit der Ausgleichsbewegung hängt stark von der Viskosität (Zähigkeit) des oberen Erdmantels ab. Für die Westantarktis konnte man diese Größe bislang nur schätzen. Barlettas Team nimmt an, dass der echte Wert der Viskosität dort um ungefähr zwei Größenordnungen niedriger liegt, die Erdkruste also erheblich fließfähiger ist als angenommen. Die Abweichung könnte zum Beispiel durch vulkanische Aktivität hervorgerufen werden. Die stärkere Verformbarkeit des Mantelgesteins ermöglicht rasche Ausgleichsbewegungen – innerhalb von Jahrzehnten statt im Lauf von Jahrtausenden.

Viel Eis verloren haben zuletzt vor allem der Thwaites-Gletscher und der Pine-Island-Gletscher. Der Erdmantel hat darauf entsprechend reagiert. Barletta und ihre Kollegen rechnen damit, dass sich die Region in Zukunft sogar noch schneller anheben wird als in den vergangenen Jahren. In 100 Jahren könnte die Hebungsrate rund dreimal so hoch sein wie heute. An manchen Stellen würde das Land dann acht Meter höher liegen. Das schlussfolgern die Forscher aus umfangreichen Simulationen mit Computermodellen der relevanten Erdbewegungen.

Hoffnung auf Stabilisierung

Es wäre wohl übertrieben, auf Grund der Studie von Entwarnung zu sprechen. Doch offensichtlich handelt es sich um eine gute Nachricht. Glaubt man früheren Schmelzberechnungen, die von den Autoren zitiert werden, legt die neue Studie nahe, dass die Gletscher selbst bei einem mittleren Temperaturanstieg (um zirka 2,8 Grad Celsius bis 2100) die Chance hätten, sich zu stabilisieren. Nur bei einer extremen Erwärmung würde der westantarktische Eisschild komplett abschmelzen.

In den kommenden Jahren sollen zwei neue Satellitenmissionen genauere Zahlen zu den Veränderungen in der Antarktis und anderen Gletscherregionen liefern: GRACE Follow-on, die Nachfolgemitmission zu GRACE, ist bereits seit Mai im All. ICESat-2, mit einem hochpräzisen Laseraltimeter an Bord, startete am 15. September 2018. Mit den neuen Daten sollte sich das Verständnis der komplexen Prozesse im alles andere als ewigen Eis weiter verbessern lassen. ◀

Sven Titz ist promovierter Meteorologe. Er arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Berlin.

QUELLEN

Bamber, J.L. et al.: The Land Ice Contribution to Sea Level during the Satellite Era. In: Environmental Research Letters 13, 063008, 2018

Barletta, V.R. et al.: Observed Rapid Bedrock Uplift in Amundsen Sea Embayment Promotes Ice-Sheet Stability. In: Science 360, S. 1335–1339, 2018

Kingslake, J. et al.: Extensive Retreat and Re-Advance of the West Antarctic Ice Sheet during the Holocene. In: Nature 558, S. 430–434, 2018

The IMBIE team: Mass Balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. In: Nature 558, S. 219–222, 2018

ARCHÄOGENETIK DIE AHNEN DER PRZEWALKSI-PFERDE

Die vermeintlich letzten Wildpferde der Welt entpuppen sich als verwilderte Nachkommen von Hauspferden. Diese weideten vor über 5000 Jahren auf den Steppen Zentralasiens, haben aber kaum Spuren im Erbgut späterer Pferdegenerationen hinterlassen.

▶ Przewalski-Pferde stehen nicht nur für einen der großen Erfolge des Artenschutzes, sondern galten bisher auch als letzte überlebende Wildpferde auf der Erde. Im Freiland starben die Tiere wohl kurz nach 1969 in ihren letzten Rückzugsgebieten auf den kargen Steppen der Mongolei aus. Allerdings hatten zwei kleine Herden mit zusammen weniger als 40 Exemplaren den Zweiten Weltkrieg im Münchener Tierpark Hellabrunn sowie im Prager Zoo überlebt. Aus diesem Grundstock wurden bis Anfang der 1990er Jahre mehr als 1500 Tiere gezüchtet und vor allem in Zentralasien wieder ausgewildert.

Nach einer umfassenden Erbgutanalyse präsentiert nun aber Ludovic Orlando vom Naturhistorischen Museum Dänemarks in Kopenhagen gemeinsam mit 46 Kollegen gleich zwei Überraschungen: Die Przewalski-Pferde sind gar keine Wildpferde, sondern verwilderte Nachkommen von Nutztieren, die im heutigen Kasachstan vor mehr als 5000 Jahren gezüchtet worden waren. Diese Botai-Pferde scheinen jedoch bei heutigen Hauspferden kaum genetische Spuren hinterlassen zu haben. Demnach könnte die Gattung mindestens zweimal unabhängig voneinander domestiziert worden sein.

Im Norden Kasachstans, wo die Steppen Zentralasiens allmählich in die Wälder Sibiriens übergehen, haben Archäologen die Reste der kupfersteinzeitlichen Siedlung Botai ausgegraben, die vor ungefähr 5000 bis 5600 Jahren bewohnt war. Bei den halb in den Boden eingegrabenen Häusern stießen die Forscher auf einige hunderttausend Tierknochen, von denen die allermeisten von Pferden stammten. Die damaligen Bewohner könnten sich zwar durchaus als Jäger und Sammler auf die Pferdejagd spezialisiert haben; allerdings passen die Funde hier sowie von zwei weiteren kasachischen Ausgrabungen namens Krasnyi Yar und Vasilkovka nicht so recht zur einer solchen Lebensweise: Hätten Pferdejäger ein Tier erbeutet, hätten sie es zerlegt und die einzelnen Teile in ihr Lager getragen. Die Archäologen fanden dagegen meist komplette Pferdeskelette, von denen noch dazu ungefähr die Hälfte jeweils von Hengsten und von Stuten stammten. Die Jäger dieser Zeit mussten sich dagegen auf weibliche Tiere konzentrieren, weil die Männchen viel schwerer zu erbeuten waren. Obendrein ließen sich Kerben in den Zähnen und Kieferknochen nachweisen, die typischerweise durch Zügel entstehen. Weitere Hinweise geben die Überreste von rund



LUDWIG / GETTY IMAGES / ISTOCK

Przewalski-Pferde galten lange als letzte überlebende Wildpferde. Jetzt stellte sich heraus, dass sie wohl verwilderte Nachkommen der ersten Hauspferde sind.

Es gibt also gute Indizien darauf, dass sich die Menschen im Norden des heutigen Kasachstan vor rund 5500 Jahren von Pferdejägern zu Züchtern gewandelt haben. Da ältere Spuren einer Domestikation bisher nicht aufgetaucht sind, könnten dort damals die weltweit ersten Hauspferde entstanden sein. Die Menschen dieser Zeit hatten wiederum gute Gründe, Pferde zu halten: Die Tiere sind hervorragend an die eiskalten Winter im Herzen Eurasiens angepasst und finden auch unter einer Schneedecke genug zu fressen. Kühe, Schafe oder Ziegen hätten dagegen mit den harschen Bedingungen erhebliche Schwierigkeiten gehabt und zusätzliches Winterfutter gebraucht, das die Viehhalter vorher hätten einlagern müssen.

Allerdings liefert die klassische Archäologie kaum Hinweise, wo die Ahnen der Nutztiere herkamen, die in Botai gezüchtet wurden. Um ihren Ursprung zu klären, analysierten die Forscher um Orlando das Genom von 20 Pferden der Botai-Kultur sowie von 22 Tieren, die während der letzten 5000 Jahre in Eurasien gelebt hatten. Zu diesen Daten kamen frühere Erbgutanalysen von 28 Pferden unserer Zeit und 18 Tieren aus der Vergangenheit. Am Ende

20 mal 15 Meter großen Koppeln: Sie dienten vermutlich der Pferdezucht, wie die Forscher aus den großen Mengen an Phosphat im Boden schließen – die Huftiere scheiden diese Substanz genau wie Menschen mit den Exkrementen aus. Tongefäße mit den Resten von Fetten und Fettsäuren, die von Stutenmilch stammten, deuten darauf hin, dass die Pferde in erster Linie Nahrung lieferten. Vielleicht wurde auch die Milch zu einem alkoholischen Getränk vergoren, so wie es noch heute in Zentralasien geschieht.



STERNE UND WELTRAUM

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2019

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wie dem sichtbaren Licht oder dem Infrarotlicht. Die Aufnahmen stammen u. a. vom Weltraumteleskop Hubble, der Jupitersonde Juno und dem Very Large Telescope der ESO.

Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2019 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte.

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

HIER KÖNNEN SIE BESTELLEN:

Telefon: 06221 9126-743

www.sterne-und-weltraum.de/kalender

E-Mail: service@spektrum.de





Bei ihren Ausgrabungen im kasachischen Botai stießen die Archäologen auf Hunderttausende von Pferdeknochen.

konnten die Forscher das Genom der Botai-Pferde mit drei Wildpferden aus der Zeit von vor 42800 bis vor 5100 Jahren sowie mit 36 Hauspferden aus Epochen von vor 5100 bis vor 100 Jahren und mit weiteren 22 heutigen Hauspferden vergleichen. Dazu gesellten sich noch sechs heute lebende Przewalski-Pferde sowie ein weiteres Exemplar, das vor mehr als 100 Jahren gelebt hatte.

Keine strikte Zuchtwahl

In der heutigen Pferdezucht darf sich, wie seit Jahrhunderten üblich, oft nur ein einziges Männchen mit besonders gewünschten Eigenschaften vermehren. Wenige solcher Zuchthengste zeugen daher viele Nachkommen, alle anderen gehen meist leer aus. Vor gut 2000 Jahren sah das anders aus. »Damals beteiligten sich sehr viele Hengste an der Vermehrung; eine intensive Zucht wie heute gab es noch nicht«, fasst der Paläogenetiker Michael Hofreiter von der Universität Potsdam, der das Erbgut einiger der untersuchten Tiere analysiert hat, die Ergebnisse einer Studie von 2017 zusammen. Auf eine ähnliche Vielfalt stießen die Forscher jetzt auch bei den Botai-Pferden. Offensichtlich gab es damals also keine so strikte Zuchtwahl wie heute. Trotzdem erkennt man bei diesen Tieren den menschlichen Einfluss: Die Botai-Pferde waren massiger gebaut als die untersuchten Wildpferde. Vermutlich bevorzugten die Züchter solche kräftigeren Tiere, weil sie mehr Fleisch lieferten.

Eine große Überraschung brachte der Vergleich der Botai-Pferde mit den Tieren, die vor maximal 4000 Jahren über die Steppen Zentralasiens trabten, im Römischen Reich gezüchtet wurden oder in den Ställen des 21. Jahrhunderts stehen: Das Erbgut dieser Tiere stimmt im Schnitt nur zu 2,7 Prozent mit dem der Botai-Pferde überein. Damit fallen Letztere als Ahnen der heutigen Hauspferde weitgehend aus.

Zwei mögliche Erklärungen bietet Hofreiter für dieses Ergebnis. »Entweder gab es irgendwo in Eurasien eine

zweite Domestizierung von einer völlig anderen Wildpferdegruppe, von der dann alle späteren Hauspferde abstammten«, überlegt der Forscher. »Oder die bereits domestizierten Botai-Pferde paarten sich häufig mit Wildpferden aus einer anderen Gruppe.« Letztere Variante hält er jedoch für unwahrscheinlich. Wo die bislang unbekannt Population für das erste Szenario gelebt haben könnte, bleibt allerdings unklar. Nach Meinung der Experten kämen dafür die Grasländer in Osteuropa wie etwa die Puszta im heutigen Ungarn in Frage. Die ersten Hauspferde könnten ihre Weiden aber genauso gut auch auf der Iberischen Halbinsel, im östlichen Anatolien, im Nahen Osten oder im Westen des heutigen Iran gehabt haben. Die Herkunft der heute lebenden Hauspferde liegt daher erst einmal weiter im Dunkeln.

Auch wenn die Forscher um Orlando dieses Rätsel bisher noch nicht lösen konnten, sorgten sie für eine Sensation, indem sie direkte Nachkommen der Botai-Pferde aufspürten: die Przewalski-Pferde. Die bis ins 20. Jahrhundert auf den Steppen der Mongolei und im Westen Chinas vorkommenden und inzwischen dort wieder ausgewilderten Tiere sind somit nicht wie bisher angenommen die letzten Wildpferde der Erde, sondern stammen direkt von den Hauspferden ab, die vor 5500 Jahren im Norden Kasachstans grasten. »Offensichtlich verwilderten vielleicht nur ein paar hundert dieser ersten Hauspferde wieder und haben bis heute als Przewalski-Pferde überlebt«, schließt Michael Hofreiter aus den Erbgutanalysen.

Dabei konnten die Przewalski-Pferde eine große genetische Vielfalt lange bewahren, wie die Analyse des Erbguts eines vor 118 Jahren gestorbenen Individuums zeigte, dessen Überreste in einem Museum landeten. Nachdem die vermeintlichen Wildpferde in der Natur ausgerottet worden waren und nur in menschlicher Obhut überlebten, büßten sie diese Vielfalt weitgehend ein.

Auch eine Farbvariante, die einst von den Botai-Menschen geschätzt wurde, ging dabei verloren. »Im Erbgut der Botai-Pferde fanden wir eindeutige Hinweise, dass einige Tiere Tigerschecken waren: Sie hatten viele dunkle Punkte auf hellem Fell«, erklärt Hofreiter. Während Züchter solche Färbungen mögen, fallen sie in der Natur auf, und die betroffenen Individuen werden leichter zur Beute von Raubtieren. Bei den Przewalski-Pferden verschwanden daher die Tigerschecken wieder. Diese Entwicklung zeigt immerhin, dass sich diese Tiere – auch wenn sie keine wirklichen Wildpferde sind – nicht mehr nach den Vorgaben menschlicher Züchter, sondern nur noch nach den Spielregeln der Natur vermehren. ◀

Roland Knauer ist promovierter Naturwissenschaftler und Wissenschaftsjournalist in Lehnin.

QUELLEN

Gaunitz, C. et al.: Ancient Genomes Revisit the Ancestry of Domestic and Przewalski's Horses. In: *Science* 360, S. 111–114, 2018

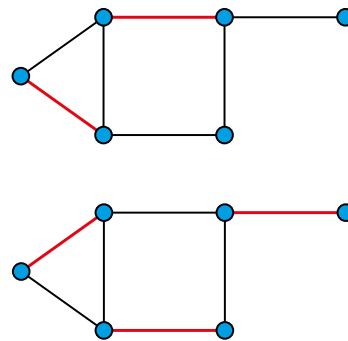
Librado, P. et al.: Ancient Genomic Changes Associated with Domestication of the Horse. In: *Science* 356, S. 442–445, 2017

MATHEMATIK OPTIMALER TAXIEINSATZ

Ein altes Problem der Graphentheorie könnte die Auslastung der Taxis von New York dramatisch verbessern.

Was wäre die Stadt New York ohne die berühmten quietschgelben Taxis? Täglich schwirren über 13000 davon durch die Straßen, auf der Suche nach Passagieren, die so schnell wie möglich von einem Ort zum nächsten müssen. Diese Art der Personenbeförderung ist allerdings nicht besonders effizient: Häufig vergeht viel Zeit, bis ein Taxifahrer einen neuen Fahrgast findet. In dieser Zeit verdient er kein Geld – und muss entsprechend hohe Preise fordern, um sein Auskommen zu finden.

Wäre dem Problem abzuhelpfen, wenn nicht der Zufall, sondern sorgfältige Planung bestimmt, welches Taxi eine Fahrt übernimmt? Moe Vazifeh vom Massachusetts Institute of Technology und seine Kollegen haben einen Algorithmus entwickelt, der sich dieser Frage annimmt. Dazu griffen sie auf



Beispiele für Paarbildungen in unterschiedlichen Graphen. Das untere Bild zeigt eine größtmögliche Paarung.

SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

ANZEIGE

SCHON MAL ANS UNTERRICHTEN GEDACHT?

Von der Außenhandelskauffrau zur Lehrerin – eine Entscheidung, die Jehan Abushihab wieder treffen würde. Heute unterrichtet die 36-Jährige mit Begeisterung am Berufskolleg.

Vor allem für die MINT-Fächer Informatik, Chemie und Physik sowie für technische Fachrichtungen werden dringend Lehrkräfte gesucht. Um in Nordrhein-Westfalen in den nächsten Jahren die Unterrichtsversorgung sicherzustellen, werden auch Personen eingestellt, die nicht die klassische Lehrerausbildung absolviert haben. Qualifizierte Seiteneinsteigerinnen und Seiteneinsteiger vermitteln fachliche und methodische Kompetenzen. Schülerinnen und Schüler erleben durch handlungsorientierten Unterricht im naturwissenschaftlichen Bereich, wie spannend und grundlegend die MINT-Disziplinen sind: für sie selbst, für unsere Gesellschaft, für Wirtschaft und Industrie und für Natur und Umwelt. Mehr Informationen unter www.lehrer-werden.nrw.

Ministerium für
Schule und Bildung
des Landes Nordrhein-Westfalen



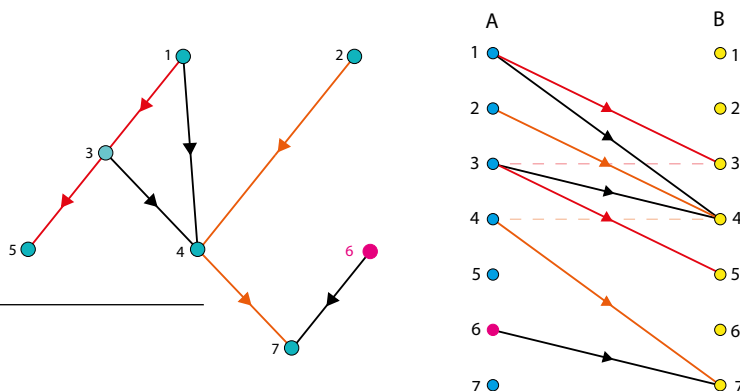
SCHLAU MACHEN
www.LEHRERIN-WERDEN.NRW

Graph für New Yorker Taxifahrten

Ein Knoten des Ausgangsgraphen (unten links) entspricht einer Taxifahrt. Zwei Punkte sind miteinander verbunden, wenn ein Taxi beide Fahrten nacheinander ausführen kann. Die Anordnung der Knoten (auf die es in einem Graphen eigentlich nicht ankommt) ist hier so gewählt, dass die Zeitachse von oben nach unten verläuft und jede Taxifahrt entsprechend dem Zeitpunkt ihrer Anforderung eingetragen ist.

Indem man die Anzahl der Knoten verdoppelt und die gerichteten Kanten entsprechend überträgt, erhält man einen bipartiten Graph (rechts). Da alle Fahrten nacheinander stattfinden, können keine Kanten von unten nach oben verlaufen.

Eine maximale Paarung ist in den Bildern rot und orange markiert. Die entsprechenden Pfade im ursprünglichen Graphen findet man, indem man den paarbildenden Kanten im rechten Bild folgt, genau wie bei einer Naht: von Knoten 1 links kommt man zur 3 rechts und geht anschließend über die linke 3 zur rechten 5. Da die linke 5 keinen Partner besitzt, endet der Pfad hier (links). Insgesamt sind je ein Fahrzeug für die beiden Pfade (rot und orange) und ein drittes für den isolierten Knoten (pink) nötig.



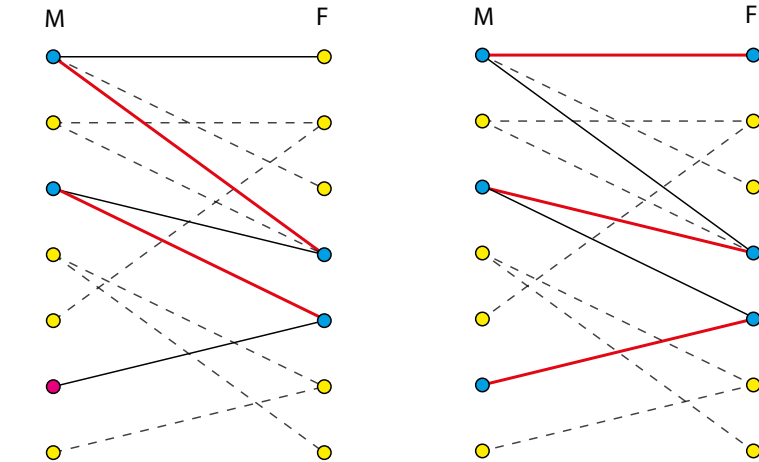
SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Gepaarte Knoten

Um eine größtmögliche Paarung in einem bipartiten Graphen effizient zu berechnen, nutzen Informatiker einen Algorithmus, den John Hopcroft und Richard Karp 1973 entwickelten. Dessen Funktionsweise kann man durch ein Beispiel veranschaulichen: In einem klassischen Tanzkurs kommen zahlreiche Männer und Frauen zusammen. Die Aufgabe des Tanzlehrers ist es, jedem Mann eine Frau zuzuordnen und dabei so viele Paare wie möglich zu bilden.

Allerdings möchte nicht jeder mit jedem tanzen, der Lehrer berücksichtigt daher nur Paare, die sich gegenseitig sympathisch sind.

In den obigen Bildern sind Männer links und Frauen rechts als Knoten dargestellt. Die möglichen Tanzpartner sind durch Kanten (gestrichelt) verbunden. Zunächst wählt der Tanzlehrer willkürlich einige Paare aus, indem er die entsprechenden Kanten rot markiert. Anschließend versucht er für



die einzelnen Männer (gelb) jeweils eine Partnerin zu finden. Wenn er ihnen direkt eine freie Tanzpartnerin zuweisen kann, dann tut er das. Sind dagegen alle möglichen Partnerinnen schon vergeben (das ist der Fall für den pinken Knoten im linken Bild), folgt der Lehrer allen möglichen Pfaden (durchgezogene Linie), die vom freien Mann ausgehen und dessen Kanten abwechselnd schwarz und rot sind. Findet er einen Pfad, der bei einer

allein stehenden Frau endet, dann färbt er sämtliche Kanten dieses Pfades um, das heißt, er trennt die bereits gebildeten Paare und ordnet die Tanzpartner neu zu (rechtes Bild). Insgesamt gibt es damit ein Paar mehr als zuvor.

Findet der Tanzlehrer keine allein stehenden Männer mehr oder nur noch Pfade, die mit vergebenen Frauen enden, dann hat er eine größtmögliche Anzahl an Paaren gefunden.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

eine öffentlich zugängliche Datenbank zu, in der die Taxifahrten in New York aus dem Jahr 2011 mit Ein- und Aussteigepunkten sowie den dazugehörigen Zeiten verfügbar sind. Sie konnten also an Beispielen aus der Vergangenheit ermitteln, wie eine Zentrale die Fahrten eines Tages auf die Taxis hätte verteilen müssen, um mit möglichst wenigen Fahrzeugen auszukommen.

Diese Aufgabe lässt sich in die Graphentheorie übertragen. Ein Graph besteht aus einer Menge von Punkten, so genannten Knoten, die durch Kanten verbunden sind. Hier entspricht jeder Knoten einer einzelnen Taxifahrt, und zwei Knoten sind durch eine Kante verbunden, wenn ein Wagen diese beiden Fahrten nacheinander ausführen kann; das heißt wenn der Fahrer, nachdem er den ersten Kunden am Ort *A* abgesetzt hat, genug Zeit hat, den nächsten Fahrgast pünktlich in *B* abzuholen.

Dabei könnten *A* und *B* theoretisch sehr weit voneinander entfernt sein, oder es könnten lange Wartezeiten zwischen beiden Fahrten liegen, so dass ein Taxifahrer währenddessen kein Geld verdient. Daher schlossen die Forscher alle Fälle aus, bei denen ein Taxi länger als 15 Minuten zu einem neuen Passagier unterwegs ist und/oder auf ihn warten muss.

Die so entstehenden Kanten des Graphen haben eine ausgewiesene Richtung: Ein Taxi kann immer nur zuerst die eine und dann die andere Fahrt bewältigen, nicht umgekehrt. Eine Folge von Knoten (Taxifahrten), die der Reihe nach durch Kanten in der richtigen Richtung verbunden sind, entspricht den Fahrten, die ein Wagen innerhalb eines Tages leisten kann. Eine solche Folge von Kanten nennt man einen Pfad. Um die Anzahl der benötigten Taxis zu minimieren, mussten die Wissenschaftler eine kleinstmögliche Menge von Pfaden im Graphen finden, die sämtliche Knoten umfassen.

Diese Aufgabe gestaltet sich meist schwierig. Je größer der Graph ist, desto länger braucht ein Computer, um ein Ergebnis zu berechnen; und diese Zeitspanne wächst sehr schnell mit der Größe des Graphen an. In New York gibt es täglich etwa 100 000 Taxifahrten – kein Computer der Welt kann eine kleinstmögliche Pfadüberdeckung für den entsprechenden Graphen in angemessener Zeit finden.

Glücklicherweise bildet der Graph von Vazifeh und seinen Kollegen eine Ausnahme: Da die gerichteten Kanten wegen der zeitlichen Abfolge der Fahrten keine Schleifen bilden (kein Pfad kann zu seinem Ausgangspunkt zurückkehren), gehört er zur Kategorie der »gerichteten

azyklischen Graphen«. Das Minimierungsproblem der Forscher lässt sich in diesem Fall auf ein scheinbar völlig unterschiedliches Problem abbilden, für dessen Lösung es ein effizientes computergestütztes Verfahren gibt: den Algorithmus von John Hopcroft und Richard Karp (siehe »Gepaarte Knoten«, S. 40). Die Rechendauer wächst dabei, anders als bei komplizierteren Graphen, nur polynomiell mit der Größe an.

Partnertanz

Um die Anzahl der benötigten Taxis zu minimieren, mussten sich Vazifeh und seine Kollegen dem berühmten Paarungsproblem (matching problem) stellen. Hier geht es darum, möglichst viele Knoten zu Paaren zusammenzubringen oder, was auf dasselbe hinausläuft, eine möglichst große Anzahl an Kanten auszuwählen, von denen keine zwei an denselben Knoten grenzen (siehe Bild S. 39 oben). Delbert Fulkerson, der im mathematischen Bereich der amerikanischen Denkfabrik RAND Corporation arbeitete, bewies schon 1955, dass die Suche nach der größtmöglichen Paarung und die nach der kleinstmöglichen Pfadüberdeckung zusammenhängen.

Dazu veränderten Vazifeh und sein Team in einem ersten Schritt die Struktur ihres ursprünglichen Graphen, indem sie die Anzahl n der Knoten verdoppelten und in zwei Mengen $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ und $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots,$

$b_n\}$ anordneten. Zwischen diesen Mengen trugen sie die gerichteten Kanten des ursprünglichen Graphen ein: Gab es beispielsweise zuvor eine Verbindung von i nach k , fügten sie diese gerichtete Kante zwischen a_i und b_k des neuen Graphen ein (siehe »Graph für New Yorker Taxifahrten«, S. 39). Beide Graphen haben gleich viele Kanten, der neue verfügt aber über die doppelte Knotenzahl.

Die neue Struktur gehört zu den »bipartiten Graphen«. Das sind solche, in denen sich alle Knoten in zwei Mengen aufteilen lassen, so dass jede Kante nur zwischen diesen beiden Mengen verläuft. Ein Beispiel für eine Paarung in einem solchen Graphen wäre eine Gruppe von Männern und Frauen, die an einem klassischen Tanzkurs teilnehmen, bei dem jedem Mann eine Tanzpartnerin zugeordnet wird.

Anschließend berechneten die Forscher mit dem Hopcroft-Karp-Algorithmus eine größtmögliche Paarung in dem bipartiten Graphen und markierten die entsprechenden paarbildenden Kanten im ursprünglichen Graphen. Diese bildeten lange gerichtete Pfade. Wie Fulkerson zeigte, ist eine optimale Lösung des einen Problems auch eine des anderen: Konstruiert man die Menge der überdeckenden Pfade aus einer maximalen Paarung, dann gibt es keine kleinere Menge von Pfaden, die alle Knoten des ursprünglichen Graphen durchlaufen (siehe »So viele Kanten wie möglich, so wenig Pfade wie nötig« S. 42).

Spektrum LIVE

Veranstaltungsreihe zum 40-jährigen Jubiläum des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

9. November 2018
Hannover

Vom Neandertal zum Konzertsaal

Professor Eckart Altenmüller erläutert in einem Gesprächskonzert, wie Musik im Gehirn verarbeitet wird und wie sie ihre emotionale Kraft entfaltet. Dabei greift er selbst zur Flöte, um anhand von Musikstücken aus verschiedenen Epochen die Wirkungen hörbar zu machen. Diese Veranstaltung findet im Rahmen des »November der Wissenschaft« in Hannover statt.

Infos und Anmeldung:

[Spektrum.de/live](https://www.spektrum.de/live)



So viele Kanten wie möglich, so wenig Pfade wie nötig

Der Mathematiker Delbert Fulkerson bewies 1955, dass sich eine minimale Pfadüberdeckung eines Graphen G durch eine maximale Paarung P des durch Knotenverdopplung entstehenden bipartiten Graphen finden lässt.

Die paarbildenden Kanten bilden Pfade im nichtbipartiten Graphen G (siehe »Graph für New Yorker Taxifahrten«, S. 39). Ein partnerloser Knoten zählt auch als Pfad. Jeder Pfad benötigt ein Taxi in Vazifehs Optimierungsproblem.

Ein Pfad, der aus k Kanten besteht, enthält $k+1$ Knoten. Die Gesamtzahl n der Knoten von G ist gleich der Anzahl p aller in den Pfaden enthaltenen Kanten plus die Anzahl T aller Pfade: $n=p+T$. Da p bei einer perfekten Paarung maximal ist, muss T minimal sein, weil n eine feste Zahl ist.

Für das Beispiel in »Graph für New Yorker Taxifahrten« ist $p=4$ und $n=7$. Es sind daher $T=3$ Fahrzeuge nötig, um alle Reisenden zu transportieren.

Auf diesem Weg haben die Wissenschaftler um Vazifeh gezeigt, dass 2011 etwa 7000 Taxis genügt hätten, um alle verbuchten Fahrten in New York zu bewältigen – das sind etwa 40 Prozent weniger, als tatsächlich in Betrieb waren.

Das Ergebnis ist vorerst aber nur von theoretischer Bedeutung – in der Praxis weiß man ja nicht, welche Anforderungen die Zukunft bringen wird. Den Forschern gelang es, ihren Algorithmus entsprechend zu modifizieren. Durch eine App würde ein Kunde wie bei Uber oder myTaxi seinen Reisewunsch äußern, den eine Zentrale empfängt und verarbeitet. Heute schickt eine Zentrale meist das nächste verfügbare Fahrzeug zu dieser Person. Vazifeh und seine Kollegen entwickelten dagegen eine andere Strategie, die sich als wesentlich ergiebiger erwies.

Die Forscher sammeln eine Minute lang alle ankommenden Anfragen. Diese stellen sie in einem Graphen dar, aus dem sie über den zuvor beschriebenen Algorithmus eine optimale Menge überdeckender Pfade und so die minimal benötigte Anzahl an Taxis berechnen – unter der Bedingung, dass kein Fahrgast länger als sechs Minuten warten muss. Über einen ganzen Tag gesehen führt diese Methode zwar nicht zur optimalen Lösung, da der Zentrale nicht die gesamte Information im Voraus zur Verfügung steht. Das Ergebnis der Wissenschaftler überrascht aber dennoch: Mit einem solchen System wäre die New Yorker Taxiflotte zwar nicht mit 60, aber immerhin mit 70 Prozent ihrer Fahrzeuge ausgekommen.

Auch der rechnerische Aufwand dieser Methode bleibt überschaubar, denn ein gewöhnlicher Computer benötigt jeweils weniger als 200 Millisekunden, um die Fahrten zu

koordinieren. Zudem ist das von den Forschern erhaltene Resultat stabil: Selbst wenn die Kundenanfrage je nach Wochentag schwankt – sonntags ist die Nachfrage beispielsweise besonders gering –, ändert sich die Anzahl benötigter Fahrzeuge kaum. Offenbar führen kleinere Abweichungen im Reiseaufkommen nicht zwingend zu größerem Fahrzeugbedarf im Straßenverkehr, was für eine Umsetzung in der Praxis wichtig ist.

Vom Monopol zum Oligopol

Allerdings setzt der von den Forschern entwickelte Algorithmus voraus, dass eine einzige Zentrale alle Taxis in New York steuert. In Wirklichkeit gibt es viele verschiedene Unternehmen, die Fahrdienste anbieten. Auch wenn ein Monopol zur Disposition von Taxifahrten ökologisch und sogar ökonomisch gesehen sinnvoll wäre, ist ein solches den Wissenschaftlern zufolge dennoch nicht erstrebenswert. Es brächte nämlich die üblichen Nachteile mit sich, zum Beispiel überhöhte Tarife aus Mangel an Konkurrenz.

Deshalb haben Vazifeh und sein Team untersucht, wie sich Oligopole auf ihre zuvor erhaltenen Ergebnisse auswirken. Sie fanden heraus, dass zwei gleich große Firmen, die den Mobilitätsmarkt beherrschen, ohne ihre Informationen untereinander zu teilen, maximal 74 Prozent der 2011 eingesetzten Fahrzeuge benötigt hätten. Drei ebenbürtige Unternehmen würden laut den Forschern zu schlimmstenfalls 77 Prozent der genutzten Taxis führen – der Algorithmus würde damit immer noch einen deutlichen Gewinn gegenüber dem gegenwärtigen Zustand bringen.

Doch wie bei vielen Optimierungsvorschlägen ist es fraglich, ob der Ansatz von Vazifeh und seinen Kollegen den Verkehr auf den Straßen wirklich entlasten würde. Sobald die Unternehmen wirtschaftlicher arbeiten, können sie Fahrten zu günstigeren Tarifen anbieten, wodurch die Nachfrage steigt. Wenn mehr Menschen individuelle Beförderungsmöglichkeiten nutzen, wächst auch die benötigte Anzahl an Taxis. Selbst falls Transportunternehmen in Zukunft effizientere Systeme nutzen, heißt das also nicht zwingend, dass Taxifahrer dadurch ihre Arbeit verlieren. Im Endeffekt würden wohl einfach mehr Menschen zu günstigeren Preisen transportiert.

Die typische Filmszene, in welcher der Hauptdarsteller eilig ein Taxi an der Straßenecke anhält, um schnellstmöglich zum Flughafen zu fahren und seine Liebste davon abzuhalten, mit dem Flugzeug das Land zu verlassen, hat in der Vision der Forscher keinen Platz mehr. Vielmehr muss er sein Handy zücken und bis zu sechs Minuten warten, bis ein Taxi zu ihm kommt – eine weniger romantische, jedoch insgesamt wirtschaftlichere Vorstellung. ◀

Manon Bischoff ist Volontärin bei **Spektrum** der Wissenschaft.

QUELLEN

Fulkerson, D.: Note on Dilworth's Decomposition Theorem for Partially Ordered Sets. In: Proceedings of the American Mathematical Society 7, S. 701–702, 1956

Vazifeh, M. et al.: Addressing the Minimum Fleet Problem in On-Demand Urban Mobility. In: Nature 557, S. 534–538, 2018



SPRINGERS EINWÜRFE EMPFINDSAMES WERKZEUG

Ein Stab in der Hand wirkt nicht bloß als dumpfer Hebelarm. Er erhöht auch die Reichweite des Tastsinns – und zwar über seine gesamte Länge.

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

» spektrum.de/artikel/1594030

Die Eingangssequenz des Films »2001« beschreibt die Menschwerdung durch tödlichen Werkzeuggebrauch. Ein Affe packt einen umherliegenden Schenkelknochen und schlägt damit einem Artgenossen den Schädel ein. Das gelingt dem davon selbst überraschten Primaten, weil der Knochen Länge und Wucht des Affenarms enorm steigert.

Stabförmiges Werkzeug lässt sich vielseitig verwenden, nicht nur als menschliche Waffe für Kampf und Jagd. Selbst Tiere stochern mit Zweigen im Boden oder in Baumrinden, um sonst unzugängliche Beute zu erreichen. So erhöht primitives Gerät die motorische Reichweite von Schnäbeln, Krallen und Gliedmaßen.

Auf den ersten Blick hilft die künstliche Körperverlängerung zwar der natürlichen Motorik, nicht aber der sinnlichen Wahrnehmung, denn der Stab selbst ist ja fühllos. Doch bei näherer Betrachtung erweitert das simple Werkzeug den Tastsinn. Es wirkt auch in sensorischer Hinsicht als verlängerter Körperteil.

Das demonstrierte ein französisch-britisch-italienisches Neurologenteam um Luke E. Miller und Alessandro Farnè von den Universitäten Lyon, London und Trient in einer aufwändigen Studie. Die Forscher untersuchten mit einer Serie von Experimenten, wie ein von Hand geführter Stab den Ort eines Objekts »wahrnimmt« (*Nature* 561, S. 239, 2018).

Tatsächlich zeigte sich, dass der ähnlich wie ein Blindenstock gebrauchte Fortsatz als sensorische Erweiterung des Körpers funktioniert. Nicht bloß die Spitze, sondern die gesamte Länge des Stabs vermag den Gegenstand zu erspüren und den Berührungspunkt richtig zu lokalisieren. Das menschliche Nervensystem ist anscheinend darauf eingestellt, die über das Werkzeug mechanisch vermittelte Information als Objektwahrnehmung zu decodieren.

Aber wie ist das möglich? Die entscheidende taktile Schnittstelle ist die um den Stab greifende Handfläche und insbesondere der darauf ruhende Zeigefinger. Wie empfängt und deutet die Haut die Signale bei Berührung eines Objekts?

Die Antwort fanden die Forscher in den winzigen Vibrationen, die der Kontakt im Stab auslöst. Dessen subtile Schwingungen treffen auf Mechanorezeptoren in der Handfläche, die offenbar von Natur aus darauf programmiert sind, aus Frequenzzusammensetzung und zeitlichem Verlauf der Vibrationen auf das verursachende Objekt zu schließen. Diese Hypothese ließ sich durch Schwingungsmessungen stützen: Je nach Art der Wellen in Stab und Zeigefinger gaben die Versuchspersonen zuverlässig an, an welchem Punkt des Werkzeugs der Kontakt stattfand.

Somit haben die Forscher gezeigt, dass das menschliche Nervensystem über fein abgestimmte Mechanismen zur Decodierung von komplexen Hautreizen verfügt, die unter anderem die Deutung von Stabschwingungen ermöglichen. Demnach scheint nicht nur die Motorik der Hand, sondern auch ihre neurale Verdrahtung den Selektionsdruck widerzuspiegeln, den der Werkzeuggebrauch ausgeübt hat.

Die schöne Studie mag zu Spekulationen darüber verleiten, wie Werkzeuge im Sport oder in der Kunst gebraucht werden. Denkt ein Tennisspieler ständig daran, wie seine Faust den Schläger hält? Wird ein Maler bei seiner Arbeit bewusst darauf achten, wie fest die Hand den Pinselgriff umklammert – oder ist nicht vielmehr die Pinselspitze sein Tastorgan, deren Druck auf die Leinwand er variiert? Und vergisst der Geiger während des Musizierens nicht, dass es seine Hand ist, die den Bogen über die Saiten führt? Geübte Künstler erweitern die Körperwahrnehmung, indem sie den Tastsinn in ihr Instrument verlagern. Mitunter gibt es sogar blinde Maler und gehörlose Musiker.

ÖKOLOGIE ENTFESSELTE ERREGER

Der Klimawandel beschleunigt die Ausbreitung bestimmter Krankheiten – und erschwert es erheblich, Epidemien vorherzusehen.



Lois Parshley ist Journalistin und Fotografin in den USA. Sie arbeitet für zahlreiche Zeitschriften.

» spektrum.de/artikel/1593998

Südafrika ist von Ausbrüchen des Rift-Tal-Fiebers bedroht. Die Gefahr solcher Epidemien könnte infolge des Klimawandels steigen. Um besser zu verstehen, in welchen Wirten das Erregervirus überdauert, untersuchen Forscher dort zahlreiche Wild- und Nutztiere.



Die Farm erstreckt sich entlang einer unbefestigten Straße, die sich durch Südafrikas zentrale Ebenen schlängelt. Hier, wo unter dem unermesslichen Himmel alles klein erscheint, treffe ich den Farmer Kobus Steenkamp. Er berichtet mir von einem Erlebnis, das er im Jahr 2010 hatte, kurz nachdem die Regenzeit vorbei war. Eines Morgens stellte er fest, dass etwas Schreckliches mit seinen Schafen geschehen war. »Ihre Hinterteile waren blutig«, erinnert er sich, »alle Muttertiere hatten ihre Föten verloren.« Es war der Albtraum eines jeden Viehzüchters: Unter den Tieren war das Rift-Tal-Fieber (Rift Valley Fever, RVF) ausgebrochen – eine Virusinfektion, die von Stechmücken übertragen wird, bei Nutz- und Wildtieren Fehlgeburten verursacht und zudem auf den Menschen übertragbar ist. Binnen weniger Tage, nachdem Steenkamps Schafe erkrankt waren, hatten sich auch dutzende Menschen im Umkreis der Farm infiziert. Die meisten litten »nur« unter grippeähnlichen Symptomen, aber bei einigen entwickelte sich ein schweres hämorrhagisches Fieber ähnlich dem Ebolafieber.

Schon bald stellte sich heraus, dass die ganze Region betroffen war. Da die Überlebensrate bei infizierten Tieren nur etwa zehn Prozent beträgt und nahezu alle betroffenen Muttertiere eine Fehlgeburt erleiden, häuften sich auf den Weiden die aufgedunsenen Kadaver, bis das staatliche Veterinäramt sie einsammeln ließ, um sie zu verbrennen. Als es endlich gelang, den Ausbruch wieder unter Kontrolle zu bringen, waren fast 9000 Tiere und 25 Menschen gestorben. Die Viehwirtschaft des Landes lag am Boden, da Nachbarländer wie Simbabwe und Namibia die Einfuhr südafrikanischen Fleisches verboten hatten.

Krankheitskeim auf Wanderschaft

Der Erreger des Rift-Tal-Fiebers wurde erstmals 1931 identifiziert, als bei einer Epidemie im kenianischen Rift Valley zahlreiche Schafe erkrankten. Es gab etliche weitere Ausbrüche, die aber auf das südliche und östliche Afrika beschränkt waren. 1977 allerdings breitete sich das Virus nach Norden aus, bedingt durch intensiveren Handel auf dem Nil, und verursachte in Ägypten eine »explosionsartige« Häufung von Infektionsfällen, wie es bei der Weltgesundheitsorganisation (WHO) hieß. Im September 2000 sprang es erstmals auf die Arabische Halbinsel über und begann nach Saudi-Arabien und Jemen auszugreifen. Experten befürchteten, Europa und Nordamerika würden als Nächste betroffen sein.

Die Sorge, der Erreger könnte innerhalb weniger Jahre auch die westliche Welt heimsuchen, ist nicht übertrieben. Am Rift-Tal-Fieber sind allein in den ersten 15 Jahren dieses Jahrtausends mehr als 100 000 Tiere verendet; zehntausende Menschen erkrankten und hunderte starben daran. Die Krankheit verbreitet sich über weitaus mehr Wirte und Überträger (so genannte Vektoren) als das West-Nil-Fieber, das New York City im Jahr 1999 erreichte und binnen sechs Jahren in den gesamten Vereinigten Staaten um sich griff. Deshalb bewertet das US-Landwirtschaftsministerium das Rift-Tal-Fieber-Virus als drittgefährlichstes Tierpathogen – hinter den Erregern der Vogelgrippe und denen der Maul- und Klauenseuche. Die

Gesundheitsbehörden sorgen sich allerdings nicht nur um die Auswirkungen des Virus auf Nutztiere und Landwirtschaft. Zoonosen – also Infektionskrankheiten wie das Rift-Tal-Fieber oder das Zikafieber, die zwischen Tieren und Menschen hin- und herspringen – bergen ein erhebliches Risiko dafür, verheerende Epidemien und Pandemien auszulösen. Sie waren für einige der schlimmsten Ausbrüche der Geschichte verantwortlich, unter anderem die Beulenpest, die Ebolafieber-Epidemie 2014 und mutmaßlich auch die Spanische Grippe 1918.

In der Angst, dass sich das Rift-Tal-Fieber zu einer globalen Pandemie ausweiten könnte, spiegelt sich unser begrenztes Vermögen wider, Krankheitsausbrüche vorherzusehen, die verheerende Folgen für die öffentliche Gesundheit, die Wirtschaft und die politische Stabilität haben könnten. Vieles spricht dafür, dass mit neu aufkommenden Zoonosen eine wachsende und schwer kalkulierbare Gefahr einhergeht. Wissenschaftler beginnen gerade erst zu verstehen, wie das Risiko von Epidemien mit dem Klimawandel zusammenhängt. Dabei zeichnet sich ein zunehmend komplexes Bild ab. Weltweit steigen die Temperaturen, in vielen Regionen unerwartet schnell, und dies wirkt sich auf Lebensräume aus. Die Habitate von Pflanzen, Tieren und Mikroben sowie die Verbreitungsgebiete von Viren verändern sich, ihre komplexen Beziehungen untereinander werden zunehmend instabil. Kürzlich veröffentlichte die renommierte Fachzeitschrift »Lancet« eine Arbeit, der zufolge der Klimawandel »die größte globale Gesundheitsbedrohung im 21. Jahrhundert« ist. Ein weiterer »Lancet«-Artikel kommt zu dem Schluss, die klimatischen Veränderungen »drohten hinsichtlich des Entwicklungsstands und der Gesundheitsfürsorge die Fortschritte des zurückliegenden halben Jahrhunderts zu untergraben«.

Die globale Erwärmung und die damit einhergehende Zunahme von Wetterextremen haben bereits dramatische Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit. Verstärkt

auf tretende Überschwemmungen, Dürren und Stürme beeinflussen, wie wir Menschen das Land nutzen und wo wir leben können. Klimaforscher bemühen sich, die Entwicklungen im Modell vorwegzunehmen, damit sich etwa Menschen in Küstennähe auf den zu erwartenden Meeresspiegelanstieg einstellen können. Auch Epidemiologen haben erkannt, wie wichtig es ist, bei der Prognose von Epidemien sowohl Wetter- als auch Klimadaten einzubeziehen. In einer immer stärker vernetzten Welt ist es eine Frage des Überlebens, globale Pandemien noch nie da gewesenen Ausmaßes abzuwenden.

Zu Steenkamps Farm fuhr ich mit dem Biologen Etienne Theron. Dessen Lastwagen, beladen mit Kühlbehältern voller Proben gesammelten Bluts, rumpelte über eine marode Piste, die von offenem Weideland flankiert ist. In dieser Gegend begannen die letzten RVF-Epidemien in Südafrika. Deshalb sammeln Theron und dutzende weitere Forscher hier fleißig Daten für ein fünfjähriges Projekt der EcoHealth Alliance, einer gemeinnützigen Organisation, die sich mit Pandemieprävention befasst. Die große Herausforderung für Wissenschaftler und politische Entscheidungsträger lautet, eine Strategie zu entwickeln, um Krankheitserreger unter Kontrolle zu bringen, bevor sie Menschen infizieren. Denn sei eine Pandemie erst einmal ausgebrochen, sagte EcoHealth-Präsident Peter Daszak 2015, könne man »nur noch das Feuer löschen«.

Ein Erreger, der Menschen und Tiere gefährdet – und für Biowaffen geeignet ist

Ziel des EcoHealth-Projekts ist es, erstmals genau zu untersuchen, wie sich die klimatischen Bedingungen im südlichen Afrika auf die Verbreitung des Rift-Tal-Fiebers auswirken. Die Wissenschaftler hoffen, anhand der gewonnenen Daten ein Modell entwickeln zu können, das Ausbrüche dieser Krankheit vorhersagen hilft, bevor sie eintreten. Ein solcher Ansatz könnte Pate stehen für die Modellierung weiterer Viruserkrankungen. Bemerkenswerterweise finanziert das US-Verteidigungsministerium das gesamte Projekt. Denn das RVF-Virus lässt sich leicht über Aerosole verbreiten und diente während des Kalten Kriegs sowohl den USA als auch der Sowjetunion zur Entwicklung von Biowaffen. Bioterrorismus ist aber nicht der einzige Grund, der das Ministerium zur Finanzierung bewog: Infektionskrankheiten wie das Rift-Tal-Fieber von Amerikas Küsten fernzuhalten, erscheint zunehmend als Frage der nationalen Sicherheit.

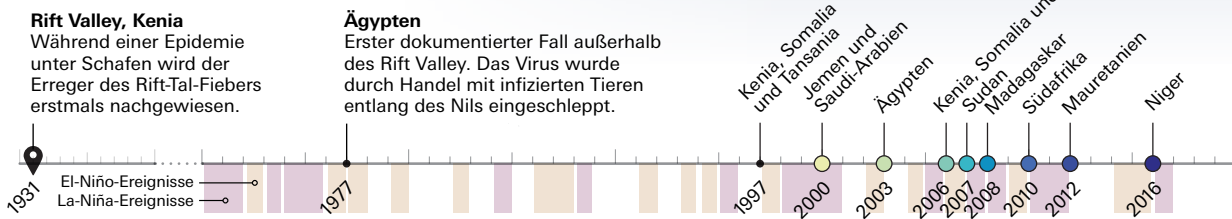
Theron und seine Kollegen haben mit den Betreibern von 361 abgelegenen Farmen (darunter Steenkamp) vereinbart, zwei Jahre lang Blutproben von Mitarbeitern sowie Nutztieren zu entnehmen, um sie auf Antikörper gegen das RVF-Virus zu testen. Die Wissenschaftler wollen so herausfinden, wo sich der Erreger versteckt, wenn niemand über aktive Krankheitsfälle berichtet. Steenkamp selbst hatte sich während eines Ausbruchs in den 1970er Jahren infiziert; laut WHO passiert das jährlich mehreren tausend Menschen. Diese Zahl wird künftig wahrscheinlich steigen. Laut einer Studie von 2016 deutet die »explorative Natur« der jüngsten Epidemien darauf hin, dass das Virus mutiert und infolgedessen ansteckender und gefähr-

AUF EINEN BLICK NEUE EPIDEMIE DURCH KLIMAWANDEL

- 1** Der Klimawandel wirkt sich auf die Verbreitung von Krankheitserregern und ihren Überträgern aus. Auch verändert er das Risiko dafür, dass Keime von Tieren auf Menschen überspringen.
- 2** Bislang können Wissenschaftler nur schwer vorher-sagen, wann und wo neue Epidemien zu erwarten sind. Ein interdisziplinärer Ansatz, der Klimamodelle einbezieht, könnte jedoch wichtige Antworten liefern.
- 3** Ein fachübergreifendes Forschungsprojekt in Süd-afrika widmet sich dem Rift-Tal-Fieber, um die Wechselwirkungen zwischen Wetter, Landnutzung, Mensch und Tier besser zu verstehen.

Ein Virus verbreitet sich

Das Rift-Tal-Fieber (Rift Valley Fever, RVF) ist eine virale Infektionskrankheit. Der Erreger, der von Stechmücken übertragen wird, ist seit 1931 bekannt, als bei einer großen Epidemie im kenianischen Rift Valley zahlreiche Schafe erkrankten. Seither kam es periodisch immer wieder zu Ausbrüchen, die mit dem atmosphärisch-maritimen Zirkulationssystem »El Niño-Southern Oscillation« (ENSO) zusammenhängen. ENSO hat einen starken Einfluss auf das Wetter, insbesondere auf die Niederschlagshäufigkeit und -intensität, und somit auch auf die Zahl der Stechmücken, die in einem bestimmten Zeitraum schlüpfen. Allerdings sind die Daten zu Rift-Tal-Fieber-Ausbrüchen lückenhaft. Im Jahr 2000 breitete sich der Erreger von Afrika über die Arabische Halbinsel aus, was Befürchtungen nährte, er könne nach Europa und Nordamerika überspringen.



Wissenschaftler untersuchen anhand von Langzeit-Klimadaten, welchen Einfluss Vegetation und Niederschlag auf das Risiko von Rift-Tal-Fieber-Epidemien haben. Auf dieser Grundlage entwickeln sie Modelle, die Ausbrüche regional vorherzusagen helfen. Damit könnte man rechtzeitig Maßnahmen ergreifen, um solche Epidemien einzudämmen oder zu verhindern. Es sind die ersten krankheitsbezogenen Modelle, die sich auf Satellitendaten zum Klimageschehen stützen.

licher geworden ist. Bei einer Ausbreitung in neue Gebiete besteht die Gefahr, dass es sich weiterentwickelt und seine Pathogenität wächst.

In Südafrika gelten Stechmücken der Spezies *Aedes mcintoshi* als Hauptüberträger des RVF-Virus. Die Mückenweibchen geben den Erreger direkt an die Nachkommen weiter; ihre Eier können jahrelange Dürren, wie sie für die Region typisch sind, überstehen. Ist die neue Generation infizierter Stechmücken geschlüpft, überträgt sie das Virus auf Nutz- und Wildtiere, in denen es sich vermehrt. Werden die infizierten Tiere dann noch von den sehr häufig vorkommenden Mücken der Gattungen *Culex* und *Anopheles* gestochen, die das Virus ihrerseits übertragen, entwickelt sich ein Ausbruch rasch zur Epidemie.

Projektkoordinatorin Claudia Cordel erklärt, die Grundlagen der Virusübertragung seien zwar bekannt, »aber wir haben keine Ahnung, wie sich eine Infektion wild lebender Tiere auf Menschen und Viehbestände auswirkt und umgekehrt«. Die Rückkopplungsschleifen, die dabei eine Rolle spielen, seien noch nicht aufgeklärt. Deshalb wollen die EcoHealth-Forscher die Wechselwirkungen zwischen Wetter, Pflanzen, Insekten, Tieren und Menschen genauer erforschen. An 22 Standorten in den Provinzen Free State und Northern Cape fangen sie Stechmücken und untersu-

chen diese auf Virenbefall, analysieren die Bodenbeschaffenheit sowie Vegetation und richten kleine Wetterstationen ein, um die lokalen Bedingungen zu überwachen und mit Satellitendaten abzugleichen. Ein solch umfassendes Vorgehen, an dem dutzende Epidemiologen, Ökologen, Klimatologen, Veterinärmediziner und Entomologen mitarbeiten, ist teuer und daher ziemlich selten. Aber die Forscher versprechen sich davon tief greifende Erkenntnisse.

»Das Krankheitsgeschehen in Tierpopulationen steht in enger Beziehung zur öffentlichen Gesundheit in menschlichen Gesellschaften«, sagt die Veterinärmedizinerin Melinda Rostal, die in dem EcoHealth-Projekt mitarbeitet. An Tieren ließen sich oft frühe Warnzeichen einer bevorstehenden Epidemie beobachten. So brachen lokale Affenpopulationen in Brasilien 2017 massiv ein – acht Monate bevor eine Gelbfieberepidemie in der Bevölkerung grassierte. Forschungsarbeiten, die die Wechselbeziehungen zwischen Mensch, Tier und Umwelt in den Blick nehmen, haben allerdings erst in jüngster Zeit an Bedeutung gewonnen. Einen solchen integrativen Ansatz, heute als »One Health« bezeichnet, beschrieb 1964 erstmals der Epidemiologe Calvin Schwabe, der damals an der University of California in Davis arbeitete. Schon Hippokrates hatte 400 v. Chr. erkannt, dass die Umwelt – einschließlich

des Wetters – Auswirkungen auf die Gesundheit hat, doch die systematische Zusammenführung verschiedener Fachdisziplinen zum besseren Verständnis komplexer Systeme ist relativ neu. Die US-Behörde CDC (Centers for Disease Control and Prevention) hat erst 2009 ein »One Health«-Büro eingerichtet, als von amtlicher Seite bestätigt wurde, dass veränderte Wechselwirkungen mit der Umwelt »zur Entstehung und zum Wiederauftreten vieler Krankheiten führen«. One-Health-Forschung ist teuer, kann sich aber auf lange Sicht als effizienter erweisen als nichtintegrative Ansätze. Die Beteiligten des EcoHealth-Projekts zum Rift-Tal-Fieber beispielsweise haben sich entschieden, multidisziplinär besetzte Forscherteams zu entsenden statt einzelner Wissenschaftler, was die Transportkosten unterm Strich um 35 Prozent gesenkt hat.

Krankheiten, welche die Ärmsten treffen

Das langjährige Fehlen einer solchen Koordinierung erklärt zum Teil, warum Gesundheitsorganisationen weltweit immer noch Nachholbedarf haben, was den Umgang mit neu auftretenden Krankheiten angeht. Das sah man am Zikafieber: Obwohl der Erreger 1947 in Uganda erstmals nachgewiesen wurde, blieb er weitgehend ignoriert, bis er ab 2015 auf dem amerikanischen Kontinent zuschlug. Krankheiten, die bei ihrem ersten Auftreten die ärmsten Bevölkerungsgruppen der Welt treffen, stoßen zunächst oft auf wenig wissenschaftliches Interesse – nicht zuletzt deshalb, weil sich die Entwicklung einschlägiger Arzneistoffe für die Pharmaindustrie häufig nicht lohnt. Laut CDC haben die so genannten vernachlässigten (Tropen-) Krankheiten in den betroffenen Bevölkerungen bereits 57 Millionen Lebensjahre gefordert. Die Erforschung des Rift-Tal-Fiebers seitens der EcoHealth Alliance ist daher nicht nur eines der bisher größten One-Health-Projekte, sondern zugleich eine wichtige Fallstudie: Können umfassende, multidisziplinäre Forschungsinitiativen diese gefährliche Wissenslücke schließen?

Satellitendaten der NASA deuten darauf hin, dass sich das Wettergeschehen im südlichen Afrika ändern wird, was die Ausbruchswahrscheinlichkeit des Rift-Tal-Fiebers und anderer infektiöser Erkrankungen beeinflusst. Die Übertragung von Krankheiten ist ein komplizierter Prozess, aber unzweifelhaft wird ein tieferes Verständnis dessen, wie sich der Klimawandel darauf auswirkt, eine Schlüsselrolle in der künftigen Gesundheitspolitik spielen.

Südafrika litt in den zurückliegenden Jahren unter anhaltender Dürre, wie sich an dem roten Boden zeigt, der überall in Schollen aufgebrochen ist. Trockenheit gehört in der Region zwar zu den typischen Begleiterscheinungen des El-Niño-Phänomens, und sobald dieses von seinem »Gegenstück« La Niña abgelöst wird, stellen sich heftige Regenfälle ein. Doch diese zyklischen Wetterereignisse verstärken sich infolge des Klimawandels. Das bedeutet, in den Dürrephasen wird es trockener und in den Regenperioden feuchter, wie Assaf Anyamba erklärt, der als Geograf am Goddard Space Flight Center der NASA arbeitet. Trotz extremer werdender Bedingungen ist es laut Anyamba möglich, anhand der Regengüsse zu prognostizieren, in welchem Ausmaß Stechmücken schlüpfen, die

mit dem RVF-Virus infiziert sind. Tatsächlich gelang es dem Geografen, den Ausbruch des Rift-Tal-Fiebers 2006 und 2007 in Ostafrika vorherzusagen, indem er sich nicht nur auf regionale Wetterdaten stützte, sondern auch mit Satellitendaten gefütterte Klimamodelle anwendete.

Mit diesem viel versprechenden Instrumentarium nahm Anyamba daraufhin das südliche Afrika und die Arabische Halbinsel in den Blick. Seine Überlegung: Lieferten die Methoden über Ostafrika hinaus für andere Gebiete zutreffende Prognosen zu RVF-Ausbrüchen, dann ließen sie sich vielleicht auf weitere Krankheiten anwenden. Aber bisher sind seine Modelle im Hinblick auf Südafrika gescheitert. Als Klimaexperte des EcoHealth-Projekts versucht er nun herauszufinden, warum.

Satellitendaten, die globale Wettermuster abbilden und vorherzusehen erlauben, erleichtern es abzuschätzen, wie sich Vegetation und Insektenpopulationen künftig verändern werden. Der Nachteil ihrer Vogelperspektive liegt in der Ungenauigkeit. Wenn Wissenschaftler jedoch Klimamodelle mit detaillierteren regionalen Daten etwa zur Pflanzenbedeckung kombinieren, haben sie es mit zwei verschiedenen Skalen zu tun. So stützten sich Anyambas Modelle von Ostafrika auf einen Vegetationsindex, der die südafrikanische Pflanzenwelt nicht widerspiegelte. Andere krankheitsrelevante Faktoren wie die Verbreitung von Überträgerorganismen können räumlich noch viel stärker variieren. Viele Stechmückenpopulationen beispielsweise leben in einem Gebiet von der Größe eines Hinterhofs, so dass die Daten gar nicht jene kleinräumige Skala erfassen, auf der Pathogene mit ihren Wirten interagieren. Obwohl Zusammenhänge zwischen Witterung und Krankheit schon lange bekannt sind – man denke an die »Grippesaison« –, macht es dieser Detailgrad sehr schwierig, Ausbrüche vorherzusehen.

Anyamba versucht nun, mit Hilfe der Informationen, die das EcoHealth-Team über die Mückenpopulationen und die Vegetation in Südafrika sammelt, ein maßgeschneidertes Modell für die Region zu erstellen. Wegen des Klimawan-

Die Studentin Zikkona Gqalaqka ist in Südafrika unterwegs, um Messungen der Bodenfeuchte vorzunehmen. Im Hintergrund sieht man eine von 22 Wetterstationen, die Daten für das EcoHealth-Forschungsprojekt zum Rift-Tal-Fieber liefern.



dels dürfte die Provinz Free State trockener werden, was Ausbrüchen des Rift-Tal-Fiebers entgegenwirken würde. In anderen Landesteilen hingegen erwarten die Forscher künftig wärmere und feuchtere Verhältnisse, was Epidemien wahrscheinlicher macht, die durch Überschwemmungen begünstigt werden (darunter das Rift-Tal-Fieber). Gelänge es, das räumlich besser zu modellieren, wüssten die Wissenschaftler genauer, wie sich das Krankheitsgeschehen künftig lokal oder auch global verändern dürfte.

Es wird auch höchste Zeit dafür. Pauschale Schlussfolgerungen sind in der Epidemiologie immer problematisch, aber es besteht kaum noch ein Zweifel daran, dass das Wetter bereits jetzt stärkere Schwankungen aufweist – und damit auch das Krankheitsgeschehen. Einer der ersten schlüssigen Belege dafür war eine Studie von 2002 in der Fachzeitschrift »PNAS«. Sie befasste sich mit der Häufigkeit von Cholerafällen in Bangladesch über einen Zeitraum von 70 Jahren hinweg und schloss mit dem

Gefährliche Mittelkürzung

Ein Programm, das die Ausbreitung tödlicher Krankheiten weltweit verhindern soll, ist von tiefen finanziellen Einschnitten bedroht.

Als zwischen 2014 und 2016 das Ebolafieber in Liberia, Sierra Leone und Guinea grassierte, breitete es sich rasch aus, da diese Länder über keine hinreichend leistungsfähigen Gesundheitssysteme verfügten, um das Virus zu stoppen. Die US-Gesundheitsbehörde CDC und andere Institutionen haben gemeinsam die Ressourcen und die nötige Expertise bereitgestellt, so dass sich die Epidemie beenden ließ. Um solche Katastrophen künftig zu verhindern, verstärkte die US-Regierung ihr Engagement in der internationalen Initiative Global Health Security Agenda (GHSA, Programm zur Sicherung der weltweiten Gesundheit). Die GHSA entwickelt eine Infrastruktur, die darauf ausgelegt ist, ein breites Spektrum biologischer Bedrohungen zu kontrollieren. Sie konzentriert sich dabei auf Entwicklungsländer, hilft aber letztlich allen, denn ohne Gegenmaßnahmen können sich Krankheiten wie das Ebolafieber heute in kurzer Zeit weltweit verbreiten.

Maßgeblich vorangetrieben von den CDC und der U.S. Agency for International Development, hat die Initiative hunderte Projekte hervorgebracht, die dazu beitragen, gefährliche Infektionskrankheiten zu erkennen und angemessen damit umzugehen. In zahlreichen Ländern sorgten Schulungen dafür, dass Labormitarbeiter neue Influenzastämme besser identifizieren

können. In Uganda entstanden ein Notfalloperationszentrum und ein Ausbildungsprogramm für Epidemiologen. Das hat Früchte getragen: Kürzlich ist dort ein Gelbfiebersausbruch binnen drei Tagen entdeckt worden; 2010 hatte dies noch 40 Tage gedauert. In Indien trug die Initiative dazu bei, dass auch entlegene Krankenhäuser rätselhafte Erkrankungen korrekt diagnostizieren können. In Sierra Leone wurden 4000 Masernfälle entdeckt, die zuvor unbemerkt geblieben waren – was zur Impfung von mehr als 2,8 Millionen Kindern führte. Und in Regionen, in denen natürlich vorkommende Milzbrandbakterien immer noch Menschen und Tiere töten, liefen Hilfsmaßnahmen an, um solche Infektionen einzudämmen und ihre Folgen zu mildern. Auf diesem Weg müssen wir weitergehen, wenn wir drohende Epidemien künftig früher erkennen und besser kontrollieren möchten. Die zurückliegenden Ausbrüche von Sars, 2009 H1N1, Mers, Vogelgrippe, Zika und anderen Erregern unterstreichen diese Notwendigkeit.

64 Länder haben sich der GHSA mittlerweile angeschlossen. Gemeinsam mit bedeutenden internationalen Organisationen stellen sie beträchtliche Mittel bereit. Das ist ein großer Fortschritt gegenüber früheren Bemühungen auf diesem Gebiet. 2007 beispielsweise war die neue Fassung der International

Health Regulations (Internationalen Gesundheitsvorschriften) in Kraft getreten, völkerrechtlich bindender Vorschriften der Weltgesundheitsorganisation zur Bekämpfung von Seuchen. Doch bis 2014 hatten weniger als ein Drittel der Unterzeichnerländer ihre damit einhergehenden Pflichten erfüllt.

Trotz der Erfolge der GHSA hatte die Trump-Regierung vor, die Mittel für die Initiative auf 59 Millionen Dollar zu kürzen. Ein gewaltiger Einschnitt, gemessen daran, dass der Kongress für den Zeitraum zwischen 2014 und 2019 dafür eine Milliarde Dollar bewilligt hatte. Den CDC wäre keine Wahl geblieben, als ihre Gesundheitsprogramme in anderen Ländern herunterzufahren, was es Entwicklungsländern mit dem höchsten Risiko für neue Epidemien deutlich erschwert hätte, solche Ausbrüche rechtzeitig in den Griff zu bekommen. Zum Glück stemmte sich der US-Kongress gegen die Pläne und setzte für viele Gesundheitsprogramme (auch die GHSA) sogar eine Mittelerrhöhung durch. Doch die Freude könnte von kurzer Dauer sein: Für das Fiskaljahr 2019 hat die Trump-Regierung erneut drastische Kürzungen in den Bereichen globale Gesundheit und medizinische Forschung vorgeschlagen.

Thomas Inglesby ist Mediziner und Direktor am Center for Health Security der Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health.

Fazit, dass sich der »Erwärmungstrend des zurückliegenden Jahrhunderts auf die öffentliche Gesundheit ausgewirkt hat«. Die Lebensräume von Stechmücken und anderen Insekten haben sich infolge der steigenden Temperaturen ausgedehnt, was mehr Menschen mit Krankheitserregern in Kontakt bringt. So zeigen die vorliegenden Daten, dass die Malaria weltweit auf dem Vormarsch ist. Ein globaler Temperaturanstieg von zwei Grad Celsius – eine Marke, der wir uns rasch nähern – würde die Zahl der Menschen, die von Malaria bedroht sind, um mehrere hundert Millionen erhöhen, schätzt die WHO. Und das, obwohl jene Gegenden, die den Malariaerregern und ihren Überträgern derzeit ideale klimatische Bedingungen bieten, dies nach der Erwärmung nicht mehr tun werden. Die Krankheitshäufigkeit wird nämlich höchstwahrscheinlich vor allem dort ansteigen, wo die Malaria derzeit noch gar nicht grassiert, etwa in den USA.

Ausbreitung bis nach Norwegen

Ein weiteres Beispiel ist die Blauzungenkrankheit, eine bei Wiederkäuern auftretende Virusinfektion, die zu Lahmheit, Fehlgeburten und anderen gravierenden Problemen führen kann. Übertragen wird sie von *Culicoides*-Mücken aus der Familie der Gnitzen. Historisch war sie auf tropische Regionen beschränkt, aber um das Jahr 2006 herum war es in Westeuropa erstmals so warm, dass einige Gnitzen einwanderten und Tiere infizierten. Wissenschaftler mussten überrascht feststellen, dass daraufhin andere, einheimische Mücken das Virus aus dem Blut erkrankter Schafe aufnahmen und bis nach Norwegen verschleppten. Für Corrie Brown, Veterinärmedizinerin an der University of Georgia, ist die Blauzungenkrankheit ein Paradebeispiel dafür, wie der Klimawandel verschiedene Arten erstmalig in Kontakt bringt und auf diese Weise dafür sorgt, dass sich Seuchen auf unvorhersehbare Weise ausbreiten.

Experten diskutieren noch, wie mit diesen Risiken am besten umzugehen sei. Die USAID (United States Agency for International Development, US-Behörde für internationale Entwicklung) unterstützt eine Strategie, die sich darauf konzentriert, neue Krankheitserreger zu identifizieren. Brown hält das alleinige Aufspüren neuer Pathogene allerdings für wenig effizient. Ob das Verfahren tatsächlich Menschen vor Infektionen bewahre, sei fraglich. Stattdessen plädieren sie und andere, die sich für einen One-Health-Ansatz engagieren, für einen Ausbau der lokalen Infrastruktur, etwa in Form von Überwachungssystemen und besser ausgebildetem Pflegepersonal. Dies sei ein ergiebigerer Weg, um mit den schwer vorhersehbaren Risiken neu auftkommender Krankheiten umzugehen. »Wenn wir die Fachkräfte des Gesundheitswesens weltweit in ihrer Kompetenz stärken, werden wir mit den kommenden Herausforderungen besser fertig«, zeigt sich Brown überzeugt.

Lokale Früherkennungssysteme sind besonders dort wichtig, wo Menschen in neue Gebiete einwandern und Erregern ausgesetzt sind, mit denen sie zuvor keinen Kontakt hatten. Epidemien nahmen ihren Ausgang oft »in Grenzgebieten, in denen Menschen in unmittelbarer Nachbarschaft zur wilden Natur leben«, betont Carrie La



SEAN MCDERMOTT

Forscher nehmen Blutproben, sowohl von Farmarbeitern als auch von Nutztieren, um sie auf Antikörper gegen das Rift-Tal-Fieber-Virus zu untersuchen. Auf diese Weise wollen sie herausfinden, wo und wie das Virus überdauert, wenn es gerade keine Erkrankungen verursacht.



SEAN MCDERMOTT



Jeunesse, die früher für die Amerikanische Gesellschaft zur Förderung der Naturwissenschaften über Ebola arbeitete. Seit 2009 verzeichnet die USAID, in welchen Gegenden neu auftretende Erkrankungen mit Pandemiepotenzial ihren Ursprung nehmen – und diese Gebiete stimmen bemerkenswert gut überein mit jenen Regionen, die von menschlichen Eingriffen wie etwa Einwanderung bedroht sind. Der Epidemiologe William Karesh, leitender Wissenschaftler im EcoHealth-Projekt zum Rift-Tal-Fieber, und seine Kollegen kamen deshalb schon 2012 in »Lancet« zu dem Schluss, dass »viele Zoonosen in direktem Zusammenhang mit weit reichenden Veränderungen in der Landnutzung stehen«.

Das gilt sicherlich auch für Südafrika. Alan Kemp, der als Entomologe im EcoHealth-Projekt mitarbeitet, sagt, es wirke fast so, als züchte der Mensch Arboviren – jene viralen Krankheitserreger, die von Gliederfüßern wie Zecken übertragen werden. »Dank der Rinderzucht und des Imports exotischer Rassen, die nicht resistent sind, bieten wir dem RVF-Virus hervorragende Möglichkeiten, sich zu vermehren: eine großteils selbst verschuldete Misere.«

Urbanisierung, Klimawandel und Armut als »Brandbeschleuniger« neuer Epidemien

Die tausenden Blutproben, die die EcoHealth-Forscher sammeln, werden in einem Hochsicherheitslabor in Johannesburg fluoreszenzmikroskopisch analysiert. Wie beim Ebolavirus ist auch die Arbeit mit dem RVF-Erreger nur unter strikten Auflagen erlaubt. Obwohl die Untersuchungen in vollem Gang sind, wird die Studie frühestens 2019 abgeschlossen sein. »Einige bezeichnen Pathogene wie den RVF-Erreger als »Bioterrorwaffe der Natur«, sagt Janusz Paweska, Leiter des südafrikanischen Centre for Emerging Zoonotic and Parasitic Diseases (Zentrum für aufkommende Zoonosen und parasitäre Erkrankungen). »Aber wer schafft denn das Umfeld für die Entstehung neuer Krankheiten? Wir Menschen sind das, und zwar durch ausufernde Urbanisierung, Klimawandel und Armut.«

Vermutlich sei Armut schon jetzt das größte Gesundheitsrisiko, sagt Antoine Flahault, Direktor des Institute of Global Health in Genf. Die ungleich verteilte Gesundheitsfürsorge ist seiner Meinung nach das Hauptproblem. Laut Schätzungen der WHO verursachen armutsbedingte Erkrankungen (etwa Durchfall, Parasitenbefall und die Folgen von Fehl- oder Mangelernährung) in einkommensschwachen Ländern etwa 45 Prozent der Todesfälle. Es wird erwartet, dass der Klimawandel in den kommenden Jahrzehnten mindestens 122 Millionen Menschen in extreme Armut treiben wird. Viele von ihnen werden gezwungen sein, ihre Heimat zu verlassen und an Orte mit besseren Lebensbedingungen zu ziehen, was zu einer raschen Urbanisierung führen und Krankheitsausbrüche zusätzlich begünstigen wird.

Allerdings können Länder mit begrenzten Ressourcen, die sich auf künftige Gesundheitsbedrohungen vorbereiten möchten, dies oft nur auf Kosten gegenwärtiger Maßnahmen tun. »Das ist ein harter Konflikt«, betont Susan Scribner, Leiterin des Projekts Preparedness & Response bei dem weltweit agierenden Unternehmen DAI (Development

Alternatives, Inc.), das sich für globale Entwicklung einsetzt. »Was wir tun, nennt man Gesundheitsfürsorge, aber in gewisser Weise hat es viel mit guter Regierungspraxis zu tun«, sagt sie. Vorhaben wie das RVF-Projekt hält sie für besonders ergiebig, denn diese lieferten nützliche Daten für zahlreiche Akteure aus den Bereichen Landwirtschaft, Gesundheit und Verteidigung. Gerade bei politischen Entscheidungsträgern, die häufig andere Prioritäten setzen, sei es wichtig, dass sie ein Verständnis für wissenschaftliche Methodik und Erkenntnis entwickelten, betont Scribner. »Denn wenn eine Pandemie grassiert, sind es nicht die Wissenschaftler, von denen Antworten erwartet werden.« Tatsächlich finanziert das Verteidigungsministerium nun auch weitere, ähnlich umfassende Forschungsvorhaben, die sich der Vorhersage widmen, in welchen Gebieten Chikungunyafieber-Ausbrüche drohen. Das Chikungunyafieber ist ebenfalls eine virale Infektionskrankheit, die von Stechmücken übertragen wird. Auch Krankheiten wie Gelbfieber, Denguefieber und sogar Tollwut bereiten Sorgen angesichts der sich wandelnden klimatischen Verhältnisse.

Fördermittel – und die Politik, die darüber entscheidet, wer sie bekommt – spielen eine entscheidende Rolle dafür, welche Krankheiten öffentliche Aufmerksamkeit bekommen und welche nicht. Im derzeitigen politischen Klima ist die langfristige Unterstützung logistisch komplexer Vorhaben wie des EcoHealth-Projekts unsicher geworden (siehe »Gefährliche Mittelkürzung«, S. 49). Just in dem Moment, in dem wir erkennen, wie wichtig ein gemeinschaftliches, umfassendes Vorgehen bei der Krankheitsbekämpfung ist, müssen die CDC eine drastische Kürzung ihrer Mittel für die globale Gesundheitsfürsorge befürchten. Noch wissen wir nicht, was das für die Machbarkeit konkreter Projekte bedeuten würde, aber laut Experten wäre es verheerend für die globale Gesundheitsfürsorge; es könnte das Wirtschaftswachstum schädigen und die politische Stabilität schwächen.

Dessen ungeachtet macht das EcoHealth-Projekt große Fortschritte. Nicht nur domestizierten, sondern auch wilden Tieren nehmen die Forscher Blut ab, darunter Kudus (afrikanischen Antilopen). Denn diese können das RVF-Virus ebenfalls übertragen. Die Blutentnahme ist bei ihnen allerdings sehr anspruchsvoll und erfordert den Einsatz von Hubschraubern, Geländewagen und Trucks, was entsprechend teuer ist. Für den Eingriff selbst werden die Tiere betäubt, doch das schadet ihnen nicht; schon nach wenigen Minuten stehen sie wieder auf und laufen weiter, während sich die Forscher die Stiefel schrubben, um keine Krankheitserreger ins nächste Einsatzgebiet einzuschleppen. ◀

QUELLEN

Allen, T. et al.: Global Hotspots and Correlates of Emerging Zoonotic Diseases. In: Nature Communications 8, 1124, 2017

Linthicum, K.J. et al.: Rift Valley Fever: An Emerging Mosquito-Borne Disease. In: Annual Review of Entomology 61, S. 395–415, 2016

Wang, H., Horton, R.: Tackling Climate Change: The Greatest Opportunity for Global Health. In: Lancet 386, S. 1798–1799, 2015

INTERVIEW

»TELOMERE SIND KEINE KRISTALLKUGELN«

Elizabeth Blackburn erhielt 2009 den Nobelpreis für die Entdeckung, dass Chromosomen durch Telomere und das Enzym Telomerase geschützt werden. Mit »Spektrum« sprach sie darüber, wie sich dieser Mechanismus auf Gesundheit, Krankheit und Lebenserwartung auswirkt.

» spektrum.de/artikel/1594000

SERIE
**Große Forscher
im Gespräch**

40 Jahre **Spektrum**
der Wissenschaft

**Teil 1: November 2018
Elizabeth Blackburn**

Teil 2: Dezember 2018
Gerardus 't Hooft

Teil 3: Januar 2019
Ulf Riebesell

Teil 4: Februar 2019
Frank Anthony Wilczek

Teil 5: März 2019
Martin Edward Hellman

Teil 6: April 2019
Erwin Neher und Bert Sakmann

Frau Professor Blackburn, 1996 schrieben Sie in einem Artikel in Spektrum der Wissenschaft, unsere somatischen Zellen könnten sich nur begrenzt oft teilen, weil mit jeder Zellteilung ihre Telomere kürzer werden. Hat sich heute, 22 Jahre später, die Sicht darauf verändert?

Die damalige Aussage hat sich bestätigt. Und der Telomerschwund hat Konsequenzen für uns Menschen, wie sich in diesen Jahren gezeigt hat. Er wirkt über die gesamte Dauer eines menschlichen Lebens, also über Jahrzehnte hinweg. Es gibt zwar einen Mechanismus in Zellen, der die Telomere verlängert, aber er gleicht ihre fortschreitende Verkürzung nicht aus – selbst in vielen Typen von Stammzellen nicht. Im gesamten Organismus sammeln sich also immer mehr Zellen mit verkürzten Telomeren an, die ihre Funktionen einstellen, aufhören sich zu teilen und, wie Biologen sagen, in die Seneszenz gehen. Das betrifft freilich nicht alle Körperzellen, sondern nur einen Teil von ihnen.

Was bedeutet das für uns?

Zahlreiche genetische und epidemiologische Untersuchungen sowie Interventionsstudien haben gezeigt, dass diese Prozesse das Risiko beeinflussen, eine der verbreiteten Volks- und Alterskrankheiten zu bekommen – etwa Herz-Kreislauf-Komplikationen, Demenz oder Krebsleiden. Die Telomerlänge ist allerdings nur einer von vielen Faktoren, die über die Wahrscheinlichkeit einer solchen Erkrankung bestimmen. Was ich besonders interessant finde: Welche Prozesse beschleunigen oder verlang-



samen die Telomerverkürzung? Inzwischen ist ziemlich klar, dass chronischer Zellstress hier eine große Rolle spielt – er kann lang anhaltende, physiologisch komplexe Effekte haben. Welche Konsequenzen das für die Dauer unserer gesunden Lebenszeit hat und wie es sich in menschlichen Populationen quantitativ auswirkt, ist eine spannende Frage. Dass wir uns mittlerweile damit befassen und die Telomerverkürzung nicht mehr nur auf molekularer Ebene untersuchen, gehört zu den Fortschritten der zurückliegenden 22 Jahre.

Zeigen unsere Telomere unser wahres biologisches Alter an?

Der Zusammenhang ist nur statistischer Art. Telomere sind keine Kristallkugeln, aus denen man ablesen könnte, nächstes Jahr sterben zu müssen. Diesem Missverständnis sitzen viele auf, die meinen, aus individuellen Telomeruntersuchungen persönliche Aussagen ableiten zu können. Statistische Auswertungen ergeben allerdings klar quantifizierbare Zusammenhänge zwischen Telomerlänge und Mortalität beziehungsweise dem Risiko künftiger Erkrankungen. Daraus lassen sich etwa Empfehlungen für die Gesundheitspolitik ableiten. Das ist mit dem Problem des Zigarettenkonsums vergleichbar: Der einzelne Raucher stirbt keinesfalls sicher an Lungenkrebs, aber Populationsuntersuchungen ergeben ganz klar ein tabakassoziiertes erhöhtes Krebsrisiko. Das spricht eindeutig für politische Maßnahmen, um den Tabakkonsum zu reduzieren.

Die Verkürzung unserer Telomere ist also nicht gleichzusetzen mit dem Ablaufen unserer Lebensuhr?

Die Geschwindigkeit, mit der diese Lebensuhr läuft, ist sehr variabel. Zahlreiche Faktoren haben einen Einfluss darauf, wie schnell die Telomere schwinden. Die Analogie der Lebensuhr ist deshalb nicht sehr gut, denn sie suggeriert ein gleichmäßiges Verstreichen der Zeit. Das Geschehen rund um die Telomere ist sehr viel dynamischer. Nützlicher erscheint es, Telommessungen mit anderen Parametern zu kombinieren. Wenn etwa bei einem Blasenkrebspatienten zum Zeitpunkt der Diagnose verkürzte Telomere im Blut nachweisbar sind, dann sagt das für sich genommen nicht viel darüber aus, wie die Krankheit verlaufen wird – ebenso wenig, wie das Vorhandensein depressiver Symptome für sich allein eine Prognose erlaubt. Liegen aber sowohl verkürzte Telomere als auch Symptome einer Depression vor, dann ist das Sterblichkeitsrisiko deutlich erhöht, wie sich gezeigt hat.

Unternehmen wie TeloYears in Kalifornien und Life Length in Pennsylvania bieten gegen Bezahlung an, die individuelle Telomerlänge zu messen. Die zeige, heißt es, das zelluläre Alter des Kunden an und sei ein Gesundheitsindikator. Diese Firmen bieten auch Beratung im Sinn einer telomererhaltenden Lebensweise.

Die Messmethode ist gut, aber was in die Ergebnisse hineininterpretiert wird, ist Quatsch. Ich habe das Unternehmen mitbegründet, aus dem später TeloYears wurde. Ich bin wieder ausgestiegen, weil es sich leider in eine törichte, kommerzielle Richtung entwickelt hat – schade.



JULIA NIMKE / LINDAU NOBEL LAUREATE MEETINGS

Professor Elizabeth Blackburn (* 26. 11. 1948)

Die australisch-amerikanische Molekularbiologin studierte an der University of Melbourne und promovierte 1975 an der University of Cambridge. 2009 erhielt sie – zusammen mit Carol Greider und Jack Szostak – den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Derzeit arbeitet sie als Professorin für Biologie und Physiologie an der University of California in San Francisco.

Bei den meisten 80-Jährigen überlappt die Verteilung der Telomerlängen mit der bei 30-Jährigen, also was soll das?

Sie schrieben, die Telomerlängen beim Menschen könnten von Jahr zu Jahr variieren.

Ja, natürlich. Das ist ein dynamischer Vorgang. Der generelle Trend geht hin zur Verkürzung – das ist der statistische Teil, den wir untersuchen. Es gibt aber immer wieder einmal Abweichungen nach oben und unten.

Ist die Telomerase auch in ausdifferenzierten Körperzellen aktiv?

Durchaus, aber die Telomerase-Aktivität wird auf sehr komplexe Weise reguliert. In Immunzellen beispielsweise sinkt sie, wenn Stresshormone einwirken. Bei verschiedenen Krebsarten können hohe beziehungsweise niedrige Telomerase-Aktivitäten unterschiedlichste Konsequenzen haben. Bei kardiovaskulären Erkrankungen wiederum ist die Situation klarer: Eine Verkürzung der Telomere ist mit verstärkten entzündlichen Prozessen verbunden. Telomerlängen-Messungen können hier also dazu dienen, Entzündungsreaktionen und den Krankheitsverlauf zu beobachten, und kurze Telomere gehen statistisch mit einem höheren Risiko kardiovaskulärer Erkrankungen einher.

Auch Kindheitstraumata sollen sehr klar mit einer dauerhaften Telomerverkürzung zusammenhängen.

Das ist richtig. Nehmen Sie die Situation an der Grenze zwischen Mexiko und den USA: Hier sind nach der illegalen Einreise tausende Kinder von ihren Eltern getrennt worden. Das ist für die betroffenen Kinder ein klassisches Trauma mit Langzeitfolgen, die wir messen können – und zwar auf der physiologischen Ebene, nicht nur auf der psychologischen.

Schon in Ihrem Spektrum-Artikel von 1996 schilderten Sie, dass Tumorzellen eine erhöhte Telomerase-Aktivität aufweisen, wodurch sie die zelluläre Seneszenz durchbrechen und potenziell unsterblich werden. Lässt sich das für die Krebstherapie nutzen, und wenn ja, wie?

Verschiedene Unternehmen arbeiten an Stoffen, die die Telomerase-Aktivität spezifisch hemmen. Aus meiner Sicht ist das ein Ansatz, der intensiver verfolgt werden sollte. Allerdings: Bei Patienten, die eine intensive Chemotherapie hinter sich haben, ist das Blut bildende System oft bereits geschädigt – insbesondere die Telomere der Blutzellen und der Stammzellen des Immunsystems. Diese Zellen brauchen ihre Telomerase, weshalb es viele Folgen hat, wenn man das Enzym hemmt. Bei Patienten in fortgeschrittenem Krankheitsstadium, deren Immunsystem infolge der Chemotherapie stark angeschlagen ist, haben sich mit diesem Ansatz deshalb inakzeptable Nebenwirkungen gezeigt. Nichtsdestoweniger halte ich das für ein interessantes, noch weitgehend unerforschtes Konzept.

Gibt es dazu klinische Studien?

Es gab schon einige, bei denen jedoch Nebenwirkungen auftraten. Wenn das Immunsystem getroffen wird, zieht das zahlreiche Probleme nach sich. Deshalb darf eine Behandlung, die auf die Telomerase abzielt, vor allem die Stammzellen des Blut bildenden Systems nicht zu sehr beeinträchtigen. Wir müssen hier ein therapeutisches Fenster treffen, so wie mit jedem anderen Wirkstoff auch. Bisher ist das noch nicht gut gelungen, aber wir stehen ja erst am Anfang.

Welche Rolle spielen Telomere beziehungsweise Telomerasen in der synthetischen Biologie, wenn es darum geht, künstliche Lebewesen zu konstruieren?

Bakterien benötigen keine Telomere, weil sie Ringchromosomen haben. Tauffliegen wiederum nutzen Heterochromatin, um schützende Chromosomenkappen zu bilden, statt Telomere aufrechtzuerhalten. Es gibt einige Organismen, bei denen sich, evolutionär bedingt, solche Umwege ausgebildet haben. Die große Mehrzahl der Eukaryoten allerdings, von Protozoen über Hefen bis zu vielzelligen Pflanzen, nutzt den Telomerase-Mechanismus. Es ist in einigen Fällen also möglich, künstliche Organismen ohne Telomere zu konzipieren, jedenfalls bis zur Komplexitätsebene von Tauffliegen. Säugetiere können Telomere durch genetische Rekombination ausbessern, ohne Mitwirkung der Telomerase. Aber kein Mensch ist je ohne Telomerase geboren worden, und Mäuse können ohne dieses Enzym nur über wenige Generationen hinweg existieren.

Sie werden als Präsidentin des Salk Institute for Biological Studies in La Jolla zurücktreten, um sich stärker in der Politik zu engagieren. Warum?

Ich habe rund 50 Jahre lang als Wissenschaftlerin gearbeitet, den Nobelpreis bekommen und werde in diesem Jahr 70. Jahrzehntelang gab es kaum etwas anderes für mich als Arbeit. Selbstverständlich liebe ich es immer noch, Wissenschaft zu betreiben, und ich setze mich als Präsidentin besonders gern für die Grundlagenforschung ein. Doch es wird Zeit, mich jetzt zu fragen, wie es weitergehen soll. Ich möchte künftig mehr in Foren und Beiräten aktiv sein – vor allem, um die Krebsforschung und Krebsmedizin zu unterstützen, an der ich nicht zuletzt wegen meiner eigenen Telomerforschung sehr interessiert bin. Wir wissen heute viel über die Prozesse der Krebsentstehung. Eine große Rolle dabei spielen Faktoren, die einen Einfluss auf die Telomerlänge haben: körperliche Aktivität, Ernährung, Verzicht aufs Rauchen und so weiter. Mit ihrer Hilfe ließe sich die Hälfte aller Krebserkrankungen vermeiden. Dies einer breiteren Öffentlichkeit zu vermitteln und für die Forschung zu werben, dafür möchte ich die Zeit nutzen, die mir noch bleibt. Ich glaube nicht, dass man im Leben beliebig lange Spitzenforschung betreiben kann. Ich bin schlicht nicht mehr so schnell wie meine jungen Mitarbeiter.

Bereits jetzt sind Sie im Wissenschaftsrat des US-Demokraten Joe Biden und im US-Wohltätigkeitsprojekt Stand Up To Cancer tätig. Planen Sie, auch außerhalb der Vereinigten Staaten an Wissenschaftsberatung mitzuwirken?

Meine Arbeit ist sehr universell. Wissenschaft kennt keine Nationalität, sie beschränkt sich nicht auf einzelne Länder. Ich wirke in mehreren europäischen Wissenschaftsbeiräten mit, ein Teil meiner Arbeit findet also schon jetzt in Europa statt. Stand Up To Cancer kooperiert ebenso mit wissenschaftsnahen Initiativen anderer Nationen, zum Beispiel mit der britischen gemeinnützigen Organisation Cancer Research UK. Mit gemeinsam gesammelten Fördergeldern unterstützen sie Forscher rund um den Globus, also auch außerhalb der Vereinigten Staaten.

Eine letzte Frage: Wo sehen Sie aktuell die großen Entwicklungslinien der Biologie? Was sind für Sie die spannendsten Forschungsfragen für die nahe Zukunft?

Es gibt noch so vieles, was wir nicht wissen. Ich meine, die größte Faszination ist das Gehirn, dieses Drei-Pfund-Organ, das nach wie vor selbst den leistungsfähigsten Computer in den Schatten stellt. In der Hirnforschung warten noch viele interessante Entdeckungen auf uns. Das ist übrigens der einzige Grund, warum ich gern länger leben würde: um mehr über dieses Faszinosum zu erfahren. Auch die Frage, wie Menschen und Maschinen interagieren können, finde ich sehr spannend, denn in der Kombination der beiden liegt ein enormes Potenzial. ◀

Die Fragen stellten »Gehirn&Geist«-Redakteurin **Michaela Mayamrschtik** und **Spektrum**-Redakteur **Frank Schubert** während der Lindauer Nobelpreisträgertagung 2018.

Der Herbst steht vor der Tür!

Denken Sie jetzt schon an Weihnachten!



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie

Print 12 Ausgaben, € 89,-
Digital 12 Ausgaben, € 60,-
Print + Digital € 95,-



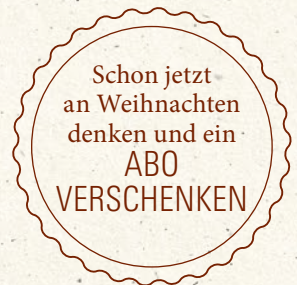
Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin

Print 12 Ausgaben, € 85,20
Digital 12 Ausgaben, € 60,-
Print + Digital € 91,20



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung

Print 12 Ausgaben, € 89,-
Digital 12 Ausgaben, € 60,-
Print + Digital € 95,-



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung

Print 4 Ausgaben, € 29,60
Digital 4 Ausgaben, € 21,-
Print + Digital € 33,60



Spannende Themen aus der Welt der Kulturwissenschaften

Print 4 Ausgaben, € 29,60
Digital 4 Ausgaben, € 21,-
Print + Digital € 33,60



Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences

Print 4 Ausgaben, € 29,60
Digital 4 Ausgaben, € 21,-
Print + Digital € 33,60



Das Magazin für den modernen selbstbestimmten Menschen

Print 6 Ausgaben, € 31,20
Digital 6 Ausgaben, € 24,60
Print + Digital € 37,20

Ein ganzes Jahr Freude

... und weitere gute Gründe, ein Abo zu verschenken

1. Auch Sie profitieren von einer Bestellung, denn Sie erhalten dafür ein Geschenk zur Wahl.
2. Bestellen Sie für sich oder einen lieben Menschen die passende Lektüre – gedruckt oder digital.
3. Pünktlich zu dem von Ihnen gewünschten Termin verschicken wir die erste Ausgabe zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.



Samsonite Regenschirm



Würfelspiel



Baumspende



Astrokalender



Buch

Jetzt bestellen:

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

www.spektrum.de/geschenk

MEERESKUNDE DEM OZEAN GEHT DIE LUFT AUS

In den tropischen und subtropischen Meeren existieren in mittleren Tiefen riesige sauerstoffarme Zonen. Im Zuge des Klimawandels dehnen sie sich immer stärker aus. Auch in Küstenregionen entstehen durch Stickstoffbelastung aus der Landwirtschaft lebensfeindliche Zonen ohne Sauerstoff – mit verheerenden Folgen für das marine Ökosystem.



Clarissa Karthäuser (links) promoviert am Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie in Bremen zum Stickstoffkreislauf im Meer. **Andreas Oschlies** ist Professor für Marine Biogeochemische Modellierung am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. **Christiane Schelten** koordiniert dort den Sonderforschungsbereich »Klima – Biogeochemische Wechselwirkungen im tropischen Ozean«, in dem Wissenschaftler Ursachen und Folgen der Sauerstoffabnahme im Ozean untersuchen.

» spektrum.de/artikel/1594004

► Etwa die Hälfte des Sauerstoffs der Atmosphäre stammt aus dem Meer: Mikroalgen, das so genannte Phytoplankton, setzen ihn bei der Fotosynthese frei. Doch obwohl die Ozeane derart viel Sauerstoff produzieren, speichern sie selbst weniger als ein Prozent davon. Diese Diskrepanz ist zum einen durch die vergleichsweise geringe Löslichkeit des Gases im Meer zu erklären. So enthält ein Liter Luft zirka die 40-fache Menge Sauerstoff, die sich in dem gleichen Volumen an Salzwasser löst. Auch verteilt sich das Gas im Ozean wesentlich langsamer als in der Atmosphäre.

Zum anderen binden Algen in nährstoffreichen, lichtdurchfluteten Gebieten große Mengen CO₂ und produzieren so Biomasse in Hülle und Fülle. Während der bei der Fotosynthese gebildete Sauerstoff nach oben in die Atmosphäre entweicht, sinkt so genannter mariner Schnee – ein Mix aus abgestorbenem Phytoplankton sowie den Ausscheidungen von Zooplankton und Fischen – in die Tiefsee. Dort werden die Bioflocken von aeroben Bakterien zersetzt, die Sauerstoff veratmen. Wird Letzterer nicht genügend nachgeliefert, etwa durch Strömungen, die sauerstoffhaltiges (oxisches) Oberflächenwasser in tiefere Schichten transportieren, kann hier eine sauerstoffarme (hypoxische) oder sogar völlig sauerstofffreie (anoxische) Zone entstehen.

Aktuelle Studien deuten darauf hin, dass der Sauerstoffgehalt im Meer in den letzten Jahrzehnten abgenommen

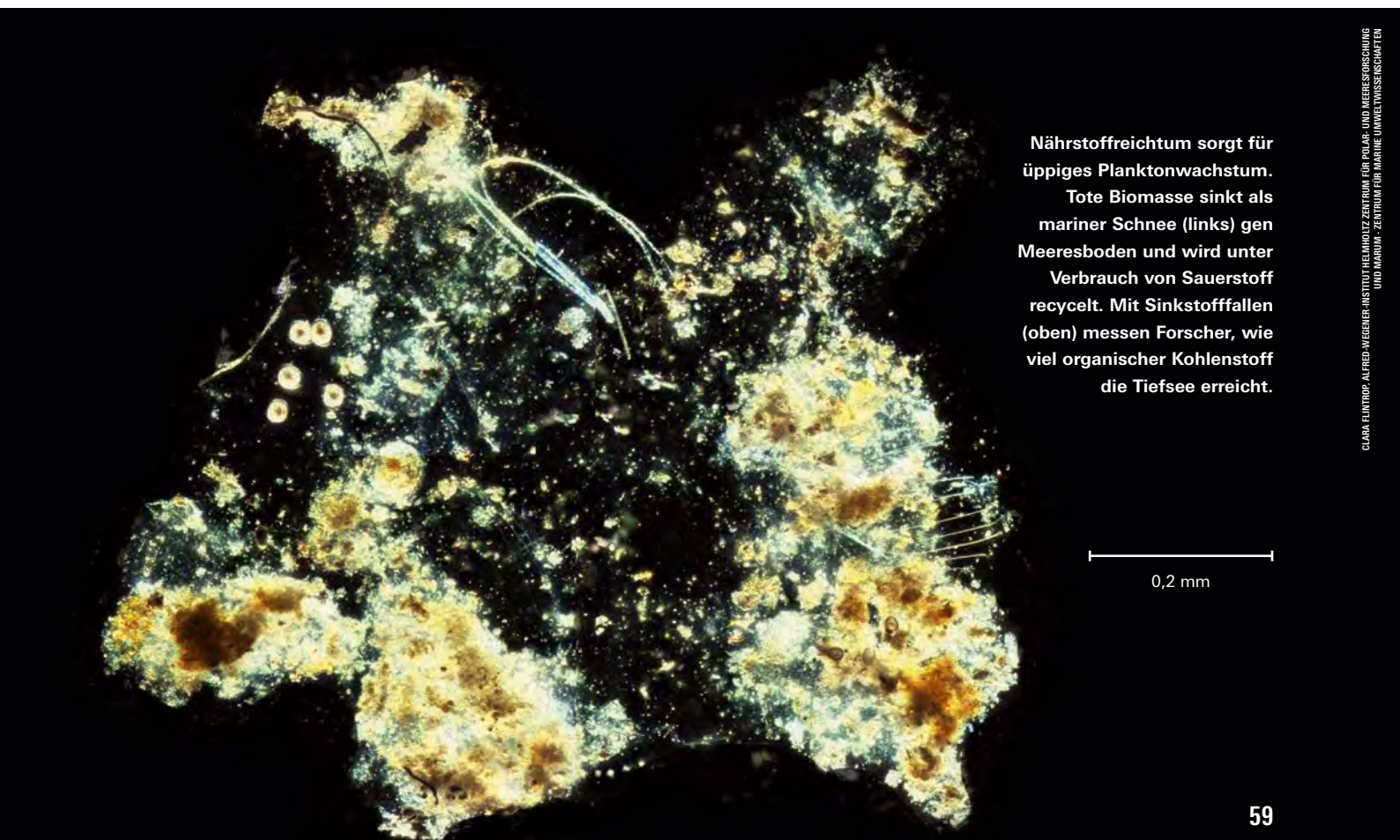
hat, und Wissenschaftlern zufolge dürfte sich der Trend in der Zukunft fortsetzen. Schuld daran sind vermutlich der Klimawandel und hohe Nährstoffeinträge. Die globale Erwärmung verlangsamt die Durchmischung der Ozeane. Außerdem sinkt die Löslichkeit von Sauerstoff im Wasser mit zunehmender Temperatur. Zusätzlich gelangen durch Emissionen von Industrie und Verkehr, übermäßigen Düngereinsatz und ungeklärte Abwässer immer mehr Nährstoffe ins Meer. Die Folge: massenhaftes Algenwachstum und ein hoher Sauerstoffverbrauch beim Abbau toter Biomasse.

Meeresforscher untersuchen, was das für die Ozeane bedeutet. Welche Veränderungen sind in bereits heute sauerstoffarmen Gebieten zu erwarten? Gibt es Regionen, die in absehbarer Zeit »umkippen« und anoxisch werden könnten? Und was lehrt uns die Erdgeschichte? Um diese Fragen zu beantworten, lohnt es sich, genauer hinzuschauen, wie der Sauerstoff ins Meer kommt und wo er verbraucht wird.

Sauerstoff ist im Ozean ungleich verteilt. Hohe Konzentrationen findet man nahe der Oberfläche, wo Algen durch Fotosynthese oft sogar mehr Sauerstoff freisetzen, als das Wasser speichern kann. Auch nachts, wenn das Phytoplankton keine Fotosynthese betreibt, ist das Meer an der Oberfläche durch ständigen Austausch mit der Atmosphäre reich an Sauerstoff. Durch Meeresströmungen und Mischungsprozesse gelangt das Oberflächenwasser in



MIT FOTO: GEN. VON CHRISTIAN HORNLEDER



Nährstoffreichtum sorgt für üppiges Planktonwachstum. Tote Biomasse sinkt als mariner Schnee (links) gen Meeresboden und wird unter Verbrauch von Sauerstoff recycelt. Mit Sinkstofffallen (oben) messen Forscher, wie viel organischer Kohlenstoff die Tiefsee erreicht.

0,2 mm

CLARA FLINTROP/ALFRED-WEGENER-INSTITUT HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR- UND MEERESFORSCHUNG UND MARINUM - ZENTRUM FÜR MARINE UMWELTWISSENSCHAFTEN

tiefere Bereiche der Ozeane – dorthin, wo Mikroorganismen herabsinkendes organisches Material abbauen. Wie sauerstoffhaltig das Wasser ist, bevor es abtaucht, hängt vor allem von seiner Temperatur ab, da warmes Wasser weniger Sauerstoff aufnehmen kann als kaltes. Hohe Konzentrationen des Gases findet man daher unter anderem in der Labradorsee zwischen Kanada und Grönland, wo ein Großteil des atlantischen Tiefenwassers seinen Ursprung hat. Grund dafür ist die Abkühlung der Meeresoberfläche, wodurch die Dichte des Wassers zunimmt, es also schwerer wird. Strömungen transportieren dieses Wasser um die ganze Welt, und erst nach rund 1000 Jahren kommt es in den tropischen und subtropischen Auftriebsgebieten wieder mit der Atmosphäre in Kontakt.

In der Zwischenzeit hat sich seine chemische Zusammensetzung stark verändert. Denn während die Wassermassen in der Tiefsee rund um den Globus zirkulieren, schneit es unaufhörlich tote Biomasse aus flacheren Zonen. Mikroorganismen, die sich davon ernähren, entziehen dem Wasser im Lauf der Jahre immer mehr Sauerstoff. Gleichzeitig setzen sie das CO₂ und die Nährstoffe wieder frei, welche die Algen an der Oberfläche einst gebunden haben. Das Tiefenwasser der Labradorsee passiert zunächst den Atlantik und hat hier einen höheren Sauerstoffgehalt als am Ende seiner Reise im nördlichen Pazifik oder Indischen Ozean.

Tiefenwasser gelangt auch an den Westküsten des afrikanischen sowie des nord- und südamerikanischen Kontinents wieder nach oben. In diesen Auftriebsgebieten treiben küstenparallele Winde das Oberflächenwasser in Richtung Äquator. Auf Grund der Corioliskraft wird es aufs offene Meer abgelenkt, und Wasser aus tieferen Schichten strömt nach. Letzteres ist reich an Nährstoffen wie Nitrat und Phosphat sowie an Spurenelementen wie Eisen, die das Wachstum von Phytoplankton ankurbeln.

Die sich vermehrenden Algen werden teils gefressen – von Zooplankton und Fischen wie Sardinen oder Ancho-

vis –, teils sinken sie in tiefere Schichten und verenden schließlich, weil dort das Licht für die Fotosynthese fehlt. Auch die Überreste der Räuber und deren Ausscheidungen fallen in die Tiefsee. Das herabsinkende organische Material verkeilt sich und verklebt zu größeren Aggregaten, marinen Schneeflocken, die mitunter mehrere Millimeter messen. Auf den Flocken siedelnde Mikroorganismen und solche, die frei schwimmen, sorgen durch ihren Stoffwechsel für einen hohen Sauerstoffverbrauch unterhalb der Zone, in der die Algen Fotosynthese betreiben. Zugleich findet in diesen Bereichen keine ausreichende Durchmischung statt, sprich, es mangelt an Sauerstoffnachschub. So entstehen hier in Tiefen zwischen 50 und 1000 Metern so genannte Sauerstoffminimumzonen.

Einige Organismen profitieren vom Sauerstoffmangel

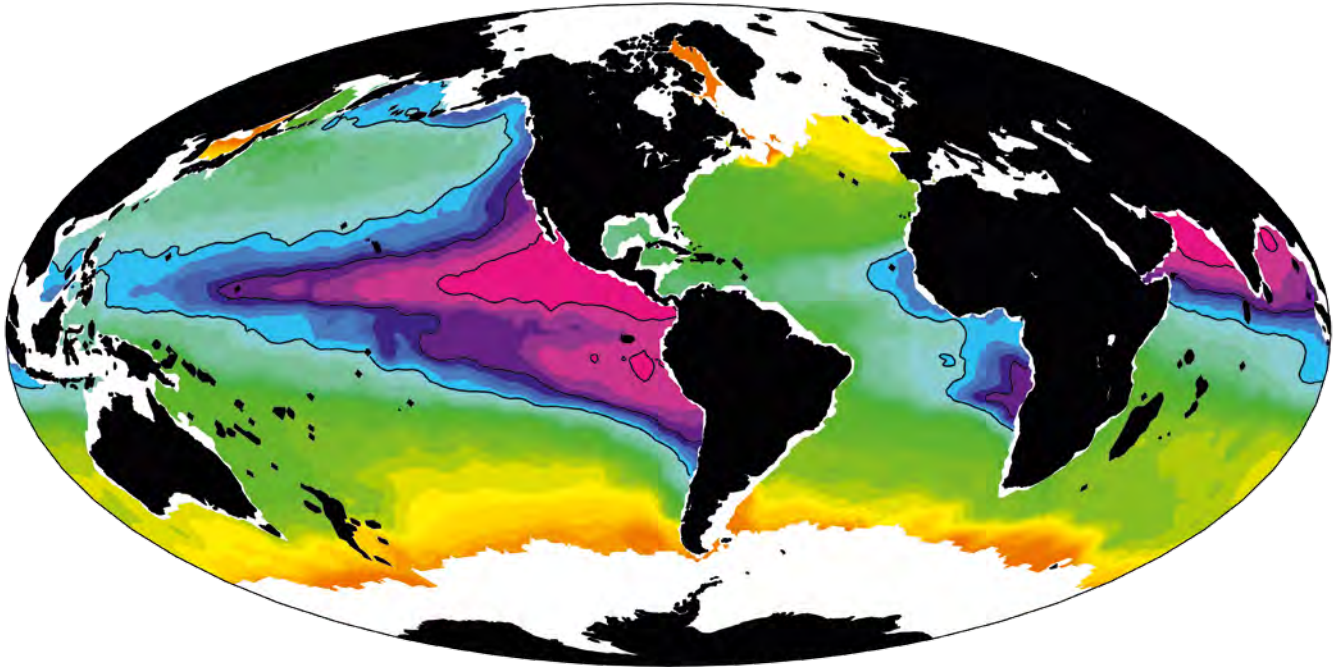
Besonders niedrige Konzentrationen des lebenswichtigen Moleküls findet man in den Auftriebsgebieten vor Peru und Chile, vor Namibia sowie im nördlichen Indischen Ozean. Sie entstehen aber auch in anderen Regionen, in denen nur schwache Strömungen herrschen, etwa in Küstengebieten mit hohen Nährstoffeinträgen vom Land und in Binnenmeeren. Ein Beispiel ist die Ostsee, in die Flüsse große Mengen Stickstoff befördern, der überwiegend aus der Landwirtschaft stammt. Das regt das Algenwachstum an. Außerdem herrscht in der Ostsee eine stabile Schichtung von wärmerem, salzarmem Oberflächenwasser und kühlerem, salzhaltigerem Wasser darunter, die sich kaum mischen. Das verhindert, dass genügend Sauerstoff in die Tiefe gelangt.

In manchen Meeresregionen – vor Peru etwa – lässt sich im Zentrum solcher Zonen kein Sauerstoff mehr nachweisen. Diese Bereiche bilden ein eigenes Ökosystem, weil hier anaerobe mikrobielle Prozesse ablaufen, die keinen Sauerstoff benötigen oder für die Sauerstoff sogar pures Gift ist. Die meisten Tiere können in diesen Wasserschichten nicht lange überleben; daher sind diese auch als Todeszonen bekannt.

Dennoch sind sie alles andere als unbelebt. Einige Organismen haben sich an den extrem niedrigen Sauerstoffgehalt angepasst und suchen dort Zuflucht vor Fressfeinden. So wie *Euphausia mucronata*, die häufigste Krillart im Humboldt-Auftriebsgebiet vor Südamerika. Die kleinen Krebse verbringen den Tag in der Tiefe und wandern nur nachts im Schutz der Dunkelheit nach oben, um Algen zu fressen und Luft zu holen. Auch verschiedene Fische und Ruderfußkrebse halten es in der »Todeszone« aus. Dafür müssen sie allerdings ihren Stoffwechsel herunterfahren – was sie träge und damit zu einer leichten Beute macht. Tief tauchende Meeressäuger wie See-Elefanten gehen hier deshalb bevorzugt auf die Jagd. Ebenso der Vampirtintenfisch, der in 600 bis 900 Meter Tiefe vorkommt. Selbst mit einer Sauerstoffsättigung von lediglich drei Prozent kommt er zurecht – dank großflächiger Kiemen und dem blauen Blutfarbstoff Hämocyanin, der Sauerstoff bei geringen Konzentrationen wesentlich effizienter bindet als unser Hämoglobin. Langfristig benötigen all diese Tiere dennoch Sauerstoff, um zu überleben.

AUF EINEN BLICK SAUERSTOFFMANGEL IM MEER

- 1** In den östlichen Ozeanen der Tropen und Subtropen sorgt der Auftrieb von nährstoffreichem Tiefenwasser für eine hohe biologische Produktivität. Gleichzeitig findet man hier große sauerstoffarme Zonen.
- 2** Diese für viele Organismen lebensfeindlichen Wasserkörper dehnen sich immer weiter aus. Ursachen dafür sind die globale Erwärmung und eine Überdüngung der Meere über Flüsse und die Atmosphäre.
- 3** Auch in Küstenregionen entstehen so »Todeszonen«, die bisweilen zu Massenfischsterben führen. Forscher fordern mehr Klimaschutz und weniger Stickstoffeinträge, um den Sauerstoffverlust zu stoppen.



Sauerstoffgehalt in etwa 400 Meter Tiefe: Im tropischen Ostpazifik und -atlantik sowie im nördlichen Indischen Ozean erstrecken sich sehr große sauerstoffarme Gebiete (pink). In den vergangenen 50 Jahren hat sich das weltweite Volumen dieser so genannten Sauerstoffminimumzonen vervierfacht. Viel Sauerstoff (orange) findet man in den hohen Breiten. Hier hat das ozeanische Tiefenwasser seinen Ursprung.



Für zahlreiche Mikroorganismen gilt das nicht: Sie werden ohne das Gas überhaupt erst aktiv oder stellen, wenn es zur Neige geht, einfach auf anaerobe Atmung um. Einige decken ihren Bedarf an Energie und Kohlenstoff, indem sie organische Verbindungen oxidieren, zum Beispiel Zucker oder Aminosäuren. Dabei reduzieren sie Nitrat (NO_3^-) zu Nitrit (NO_2^-), Lachgas (N_2O) und schließlich zu molekularem Stickstoff (N_2). Andere verwenden Eisen-, Mangan- oder Sulfationen (SO_4^{2-}) an Stelle von Sauerstoff. Und manche einzelligen Bewohner der Sauerstoffminimumzone sind wie die Algen bei der Fotosynthese in der Lage, im Wasser gelöstes CO_2 zu fixieren. Statt Sonnenlicht nutzen sie dafür chemisch gebundene Energie, die in reduzierten anorganischen Verbindungen wie Ammonium (NH_4^+) und Schwefelwasserstoff (H_2S) steckt. Bei deren Oxidation wird Energie frei, die es den Organismen erlaubt, Zucker und andere fürs Wachstum benötigte Moleküle aus CO_2 zu synthetisieren.

Die mikrobiellen Prozesse in den sauerstoffarmen Regionen der Meere spielen eine zentrale Rolle im globalen Zyklus einiger biologisch relevanter Elemente. Für den Stickstoffkreislauf trifft das in besonderem Maße zu: Stickstoff ist ein wichtiger Nährstoff und macht 78 Prozent der Erdatmosphäre aus. In der Luft liegt er vor allem als N_2 -Molekül vor, in dem die beiden Atome mit einer starken Dreifachbindung verknüpft sind. In dieser Form ist er für die meisten Lebewesen wertlos. Nur wenige Einzeller können die Bindung knacken und Luftstickstoff in Ammoniak umwandeln, um damit zum Beispiel Aminosäuren zu

synthetisieren. Der Mensch ahmt diesen natürlichen Prozess im Haber-Bosch-Verfahren nach und stellt so Ammoniumnitrat und Harnstoff her, als Dünger für die Landwirtschaft.

Tiere und Pflanzen nehmen den biologisch verfügbaren Stickstoff auf. Sterben sie, recyceln Mikroorganismen ihre Biomasse und setzen den Stickstoff wieder frei, vor allem in Form von Ammonium und Nitrat. Zwei Gruppen von Bakterien, die Forscher in Sauerstoffminimumzonen in großer Zahl gefunden haben, verwandeln die Verbindungen wieder in Luftstickstoff. Dies sind zum einen so genannte Denitrifizierer, die organischen Kohlenstoff mit Hilfe von Nitrat oxidieren, und zum anderen erst Mitte der 1990er Jahre entdeckte Anammox-Bakterien, die Ammonium mit Nitrit veratmen, um Energie für die CO_2 -Fixierung zu gewinnen. Die hohe Verfügbarkeit von Nährstoffen und die Sauerstoffknappheit in den Auftriebsgebieten schaffen optimale Bedingungen für diese Prozesse: Wissenschaftler schätzen, dass 20 bis 40 Prozent des Verlusts an verwertbarem Stickstoff im Ozean zu Lasten der sauerstofffreien Zonen gehen, obwohl sie weniger als ein Prozent des gesamten Volumens ausmachen. Auf diese Weise regulie-

Die »Todeszonen« regulieren langfristig die Produktivität großer Teile der Meere



CLAUDIA FREY, UNIVERSITÄT BASEL

In den vergangenen Jahren haben Wissenschaftler an Bord des deutschen Forschungsschiffs »Meteor« die Sauerstoffminimumzone vor der Küste Südamerikas intensiv beprobt. Sie reicht mehrere tausend Kilometer in den Ostpazifik.

ren die »Todeszonen« langfristig die Produktivität großer Teile der Meere. Denn das Wasser gelangt irgendwann wieder an die Oberfläche, und oft begrenzt die Menge an biologisch verfügbarem Stickstoff das Algenwachstum.

Auch im globalen Kohlenstoffkreislauf sind die Auftriebsgebiete wichtig, weil hier große Mengen CO_2 bei der Fotosynthese fixiert und als mariner Schnee in die Tiefsee verfrachtet werden. Im Schnitt erreicht jedoch kaum ein Prozent des Kohlenstoffs den Meeresboden. Den Rest setzen Mikroorganismen wieder als CO_2 frei, während er hunderte oder gar tausende Meter Wasser durchquert. In Abwesenheit von Sauerstoff geschieht das allerdings langsamer, so dass in Auftriebsgebieten mehr organisch gebundener Kohlenstoff den Boden erreicht und dem Kreislauf entzogen wird als in anderen Meeresregionen.

Der Mensch macht große Mengen Stickstoff biologisch verfügbar und überdüngt so die Meere

Die Emissionen von Treibhausgasen – insbesondere von CO_2 , aber auch von Methan und Lachgas – lassen die Temperatur der Atmosphäre steigen und damit die des Ozeans. Weil gleichzeitig die Löslichkeit von Sauerstoff im Meerwasser sinkt, gehen Ozeanografen davon aus, dass sich die sauerstoffarmen Zonen in den kommenden Jahrzehnten ausweiten werden. Tatsächlich hat sich deren Volumen seit Mitte des 20. Jahrhunderts weltweit bereits vervierfacht, wie Langzeitstudien zeigen. Die verringerte Löslichkeit erklärt aber weniger als die Hälfte der beobachteten Sauerstoffabnahme. Der Großteil ist auf eine schwächere Ozeanzirkulation zurückzuführen – eine weitere Folge der Ozeanerwärmung: Da sich das Oberflächenwasser aufheizt

und an Dichte verliert, wird die Schichtung der Wassersäule stabiler. Es braucht also mehr Energie, um sauerstoffreiches Wasser in die Tiefe zu transportieren. Die Belüftung des Ozeans nimmt im Zuge des Klimawandels somit ab.

Zusätzlich greift der Mensch in den Nährstoffhaushalt der Meere ein, indem er riesige Mengen Stickstoff biologisch verfügbar macht (gut die Hälfte der Stickstofffixierung auf der Erde geschieht über das Haber-Bosch-Verfahren, den Rest übernehmen Bakterien). Erhebliche Mengen Stickstoff aus Kunstdünger und Gülle gelangen in Flüsse und landen schließlich im Meer. Vor allem in küstennahen Gebieten führt das zu übermäßigem Algenwachstum und hohem Sauerstoffverbrauch. Binnen kurzer Zeit kann Überdüngung ein artenreiches Habitat in einen für Fische, Krebse und Muscheln lebensfeindlichen Wasserkörper verwandeln.

Auf lange Sicht wirken Sauerstoffminimumzonen dem Überangebot an Nährstoffen teilweise entgegen. Denn dort laufen ebenjene mikrobiellen Prozesse ab, die aus Nitrat oder Ammonium wieder wertlosen Luftstickstoff machen. Diese Pufferwirkung ist aber von weiteren Faktoren abhängig, wie der Durchmischung und der Temperatur des Meerwassers. Kurzfristig hilft der Nährstoffabbau beispielsweise erstickenden Kiemenatmern nicht. Auf Dauer ermöglicht er jedoch, dass Ökosysteme sich regenerieren beziehungsweise dass sich allmählich ein neues Gleichgewicht zwischen Stickstoffzufuhr und -verlust einpendelt.

Was in den Weltmeeren passiert, wenn der Sauerstoffgehalt sinkt, lässt sich auch in Deutschland beobachten, vor allem an der Ostseeküste: Die Fischbestände gehen

hier zurück, und es kommt zu Massensterben, wenn sich das Wasser über den Sommer stark aufheizt. Das geschah etwa im Herbst 2017, als am Strand von Eckernförde tausende tote Dorsche, Plattfische und andere Meerestiere angespült wurden. Hauptursache dafür war ein andauernder starker Südwestwind, der sauerstoffreiches Oberflächenwasser von der Küste in Richtung offene Ostsee drückte. Dadurch strömte sauerstoffarmes Wasser aus der Tiefe nach oben, das die Fische offensichtlich überraschte.

Toxisches Molekül aus dem Meeresboden

Für den Dorsch ist der zunehmende Sauerstoffmangel noch aus einem weiteren Grund problematisch: Dorscheier haben eine Dichte, die jener des Tiefenwassers in der Ostsee entspricht und sie ein Stück über dem Meeresboden schweben lässt. Wird diese Zone nicht häufig genug durch aus der Nordsee herüberschwappendes Wasser belüftet, das sauerstoffreich ist und schwerer als das der Ostsee, ersticken die Embryos.

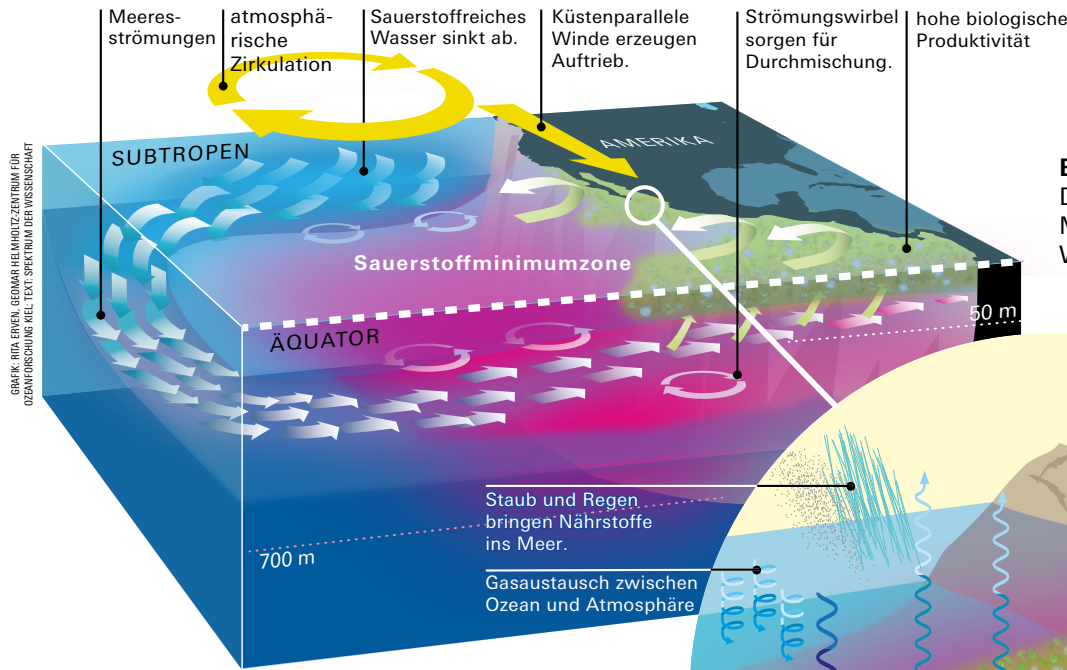
Eine weitere Gefahr für Fische und andere Lebewesen ist die Anreicherung von sauerstoffarmen Meeresregionen mit toxischem Schwefelwasserstoff. Der entsteht im Sediment, wo er in Anwesenheit von Sauerstoff durch Mikroorganismen auch gleich wieder zu ungiftigem Sulfat umgewandelt wird. Wenn der Sauerstoff allerdings fehlt, kann die giftige Verbindung in das Wasser entweichen und so ebenfalls Massensterben verursachen. Vor der Küste Namibias etwa kam es in der Vergangenheit wiederholt zu Freisetzungen von Schwefelwasserstoff aus dem Meeresgrund. Das größte jemals dokumentierte Ereignis dieser Art, bei dem unzählige Fische umkamen, beobachteten deutsche Forscher 2009 während einer Expedition in den Küstengewässern Perus. Angesichts der zunehmenden Ausdehnung der Sauerstoffminimumzonen können solche Ereignisse in Zukunft öfter auftreten.

Auch Fischpopulationen weit draußen im offenen Meer sind von der abnehmenden Menge an Sauerstoff betroffen. Ein Beispiel ist der Blauflossen-Tunfisch, ein wahrer Extrem-

Wie Todeszonen entstehen

PHYSIK: Mangelnde Belüftung

Ozeanische Strömungen liefern nicht genügend Sauerstoff nach.

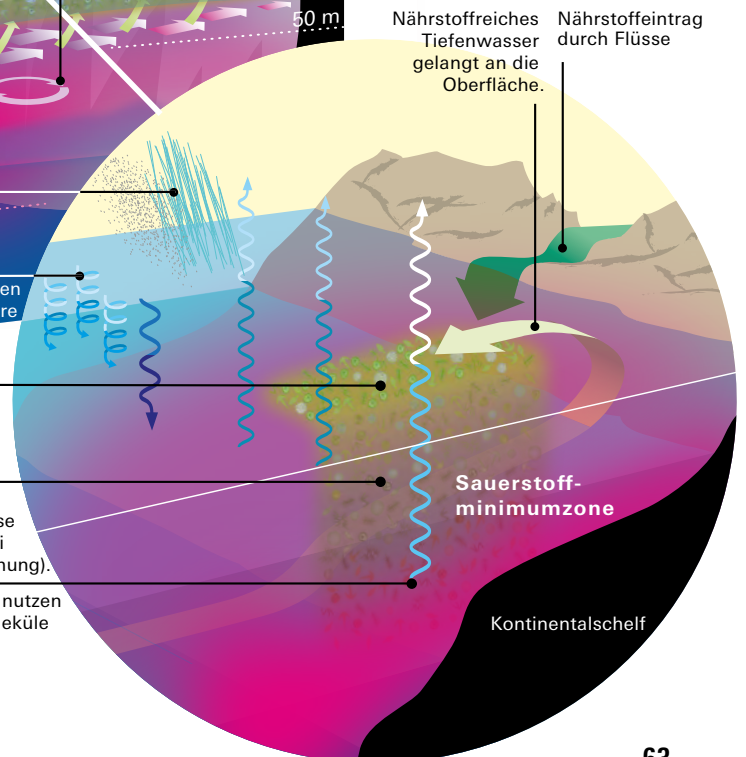


BIOLOGIE: Hoher Verbrauch
Der Abbau von organischem Material entzieht dem Wasser Sauerstoff.

Nährstoffreiches Tiefenwasser gelangt an die Oberfläche.
Nährstoffeintrag durch Flüsse

Nährstoffreichtum sorgt für starkes Algenwachstum.
Mikroorganismen zersetzen tote Biomasse und verbrauchen dabei Sauerstoff (aerobe Atmung).
Bei Sauerstoffmangel nutzen Mikroorganismen Moleküle wie Nitrat und Nitrit (anaerobe Atmung).

In den Auftriebsgebieten der Meere sorgt ein Zusammenspiel von Physik und Biologie für Sauerstoffmangel: Der Nährstoff- und Planktonreichtum an der Oberfläche führt zu einem hohen Sauerstoffverbrauch in tieferen Zonen. Dort herrschen nur schwache Strömungen, die relativ sauerstoffarmes Wasser transportieren.



sportler, der weite Strecken zurücklegt und seinen torpedoförmigen Körper auf bis zu 80 Kilometer pro Stunde beschleunigen kann. Solche Höchstleistungen erfordern viel Sauerstoff. Deshalb sind Tunfische – deren Populationen durch Überfischung ohnehin bereits stark dezimiert sind – von der Ozeanerwärmung und der abnehmenden Löslichkeit von Sauerstoff im Meerwasser bedroht.

Der Sauerstoffverlust kann einen Teufelskreis in Gang setzen, der kaum zu durchbrechen ist

Ebenfalls bedeutsam ist die Ausbreitung der »Todeszonen« für die Aktivität von Mikroorganismen: Lange gingen Ozeanografen davon aus, dass der an die indische Ostküste grenzende Golf von Bengalen in Tiefen von zirka 100 bis 400 Metern anoxisch ist. Trotz des Mangels an Sauerstoff und einer hohen Nährstoffverfügbarkeit (durch Flusseinträge aus den bevölkerungsreichen Anrainerstaaten) konnte man jedoch wider Erwarten kaum anaerobe bakterielle Prozesse messen, die für derartige Wasserkörper typisch sind. Forscher des Max-Planck-Instituts für Marine Mikrobiologie in Bremen und der Süddänischen Universität haben deshalb 2016 mit hochempfindlichen Sensoren nachgemessen, die weniger als 0,01 Prozent Sauerstoffsättigung detektieren können. Das Ergebnis: Der Golf von Bengalen ist nur fast anoxisch. Mikroorganismen, die Nitrat oder Ammonium veratmen, werden hier offenbar durch Spuren von Sauerstoff gehemmt. Sollten diese jedoch restlos verschwinden, etwa weil die Wassertemperatur ansteigt, könnten Denitrifizierer und Anammox-Bakterien deutlich aktiver werden und mehr Nährstoffe in Luftstickstoff umwandeln. Eine nur geringe Veränderung des Sauerstoffgehalts in der Region hätte also möglicherweise weit reichende Folgen.

Ein besonderes Phänomen bei der Ausweitung sauerstoffarmer Zonen sind so genannte positive Rückkopplungen – Prozesse, die sich selbst verstärken. Phosphat (PO_4^{3-}), neben Nitrat der wichtigste Nährstoff im Ozean, gelangt als Bestandteil des marinen Schnees in die Tiefsee und reichert sich unter oxischen Bedingungen im Sediment an. Es bindet dort an organische und anorganische Partikel. Bei sehr niedrigen Sauerstoffkonzentrationen gelangt Phosphat jedoch wieder in die bodennahe Wasserschicht. Gleiches gilt für das Spurenelement Eisen.

Daraus kann ein wahrer Teufelskreis entstehen: Fehlt Sauerstoff, wird zusätzliches Phosphat verfügbar, das schließlich die obere, sonnendurchflutete Wasserschicht erreicht und dort Algen zum Wachstum anregt. Vor allem Zyanobakterien, die Luftstickstoff fixieren können,



profitieren von Phosphat. So entsteht mehr absinkende Biomasse, die von Mikroorganismen unter Verbrauch von Sauerstoff zersetzt wird. Der sauerstoffarme Wasserkörper schwillt weiter an und löst Phosphat sowie Eisen aus immer größeren Sedimentflächen. Einmal in Gang gesetzt, sind solche Rückkopplungsmechanismen nur schwer zu stoppen. Sie treten zum Beispiel in der Ostsee auf. Trotz der inzwischen stark reduzierten Nährstoffeinträge breiten sich die anoxischen Gebiete dort nach wie vor aus, und es kommt vermehrt zu starken Algenblüten.

Im Lauf der Erdgeschichte haben sich warme und kalte Phasen immer wieder abgewechselt. Was können wir daraus für die Zukunft der Meere lernen? So genannte ozeanische anoxische Events, die mit einer starken Abnahme des Sauerstoffgehalts in den Ozeanen einhergingen, traten vor allem in Perioden rascher globaler Erwärmung auf und waren mit hohen CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre verbunden. Beispiele für solche Ereignisse finden sich etwa in der Kreidezeit (145 bis 66 Millionen Jahre vor heute). Wissenschaftler vermuten, dass Vulkane einst große Mengen an Treibhausgasen freisetzen und die Atmosphäre aufheizten. In der Folge veränderten sich auch die Meeresströmungen, die Tropen und Subtropen reichten deutlich weiter in Richtung Pole als heute. Die hohen Temperaturen intensivierten zudem den globalen



EPICSTOCKMEDIA / FOTOLIA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



Die nährstoffreichen Gewässer vor Peru (linkes Bild) bieten Algen ideale Wachstumsbedingungen. Der Abbau toter Biomasse führt in Extremfällen dazu, dass sich das Meerwasser mit Schwefelwasserstoff anreichert und wie vor der Küste Namibias (rechtes Bild) milchig türkis färbt.

Die Nährstoffverfügbarkeit im Meer hingegen ist je nach Region steuerbar. Während die hohe Produktion von Biomasse vor der Küste Perus aus einem natürlichen Prozess – dem Auftrieb von nährstoffreichem Tiefenwasser – resultiert, stammen die Nährstoffe in Gewässern wie der Ostsee oder dem Golf von Bengalen zu einem erheblichen Teil aus Haushalts- und Industrieabwässern sowie der Landwirtschaft. Um die Mengen dort zu reduzieren, müsste man weniger Dünger einsetzen und in Kläranlagen investieren.

Immer mehr Nährstoffe fallen vom Himmel

Eine weitere, zunehmend relevante Nährstoffquelle im offenen Ozean sind Luftschadstoffe, zum Beispiel Stickoxide. Aus verkehrs- und industriellastigen Regionen stammend verteilen sie sich rund um den Globus. Regen wäscht die Verbindungen aus der Atmosphäre und spült sie ins Meer. Der atmosphärische Stickstoffeintrag in den Ozean entspricht nach aktuellen Berechnungen etwa der Menge, die weltweit über Flüsse in Küstengewässer gelangt.

Forscher haben im vergangenen Jahrzehnt große Fortschritte gemacht, Sauerstoffminimumzonen und die dort ablaufenden Prozesse zu verstehen. Dennoch ist bislang nicht vollständig beantwortet, was deren Entstehung sowie den Transport und Abbau von organischem Material unter anoxischen Bedingungen reguliert. Mit Computermodellen lassen sich ohne solche Informationen nur schwer präzise Vorhersagen für den Ozean treffen. So ist die tatsächlich gemessene Sauerstoffabnahme im Meer etwa doppelt so hoch wie von hoch aufgelösten Modellen angegeben. Es ist unklar, ob dem eine fehlerhafte Abschätzung der sich verändernden Ozeanzirkulation zu Grunde liegt oder die Modelle die biologischen und chemischen Prozesse noch nicht richtig erfassen. Zukünftige Expeditionen und Langzeitbeobachtungen in den Auftriebsgebieten werden darauf eine Antwort liefern. ◀

Wasserkreislauf, was mit verstärkter Verwitterung von Gesteinen und höheren Nährstoffeinträgen in die Ozeane einherging, etwa in Form von Phosphat. Letzten Endes führte das zu erheblich weniger Sauerstoff in den Meeren. Eines dieser anoxischen Events vor rund 91,5 Millionen Jahren löste eines der fünf großen Massenaussterben aus.

Die Kreidezeit war von Prozessen geprägt, die auch heute sauerstoffarme Zonen entstehen lassen: mangelnde Durchmischung des Tiefenwassers kombiniert mit einer geringeren Sauerstofflöslichkeit auf Grund der gestiegenen Ozeantemperatur und reichlich Nährstoffen. Das sorgte für eine sehr produktive Schicht nahe der Meeresoberfläche. Darunter bildete sich eine riesige sauerstofffreie Zone. Da organisches Material hier vergleichsweise langsam abgebaut wird, erreichte ein größerer Anteil als heute den Meeresgrund. Über Jahrmillionen verwandelten sich diese Ablagerungen zu fossilen Brennstoffen, die der Mensch dem Kohlenstoffkreislauf nun wieder zuführt.

Was tragen wir also bei zur Ausdehnung von sauerstoffarmen Meeresregionen? Und können wir verhindern, dass weitere Todeszonen entstehen? Es gibt zwei wichtige Faktoren, auf die wir Einfluss haben: die globale Erwärmung und die gewaltigen Nährstoffeinträge in den Ozean.

Der Klimawandel ist ein globales und vielschichtiges Problem, das nur auf internationaler Ebene zu lösen ist.

JEFF SCHMALTZ, NASA/GSFC (HTTPS://VISELEARTH.NASA.GOV/VIEW.PHP?ID=72821)

QUELLEN

- Breitburg, D. et al.:** Declining Oxygen in the Global Ocean and Coastal Waters. In: Science 359, eaam7240, 2018
- Bristow, L. A. et al.:** N₂ Production Rates Limited by Nitrite Availability in the Bay of Bengal Oxygen Minimum Zone. In: Nature Geoscience 10, S. 24–29, 2017
- Duce, R. A. et al.:** Impacts of Atmospheric Anthropogenic Nitrogen on the Open Ocean. In: Science 320, S. 893–897, 2008
- Schmidtko, S. et al.:** Decline in Global Oceanic Oxygen Content during the Past Five Decades. In: Nature 542, S. 335–339, 2017
- Stramma, L. et al.:** Expansion of Oxygen Minimum Zones May Reduce Available Habitat for Tropical Pelagic Fishes. In: Nature Climate Change 2, S. 33–37, 2012

Spektrum PLUS⁺

DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

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

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

- Download des Monats im November: **Spektrum** KOMPAKT »Saurier«
- Kostenlose Teilnahme von 10 Abonnenten an der Fachtagung des Deutschen Hochschulverbands zum Thema »Das schönste Gefühl: Liebe aus Sicht der Wissenschaft« am 7. November 2018 in Bonn. Es entscheidet die Reihenfolge des Anmeldungseingangs.
- Führung für Abonnenten durch die Sonderausstellung »MUMIEN – Geheimnisse des Lebens« in den Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim am 23. November 2018
- Reduzierter Eintritt zum Stuttgarter Zukunftssymposium »Mensch bleiben im Maschinenraum« vom 23. bis 24. November 2018
- Ermäßigter Preis für die Hurtigruten-Reise »Zauber des Nordlichts« im März 2019 sowie auf ausgewählte Reisen aus dem Programm von birdingtours
- Veranstaltungen der neuen Reihe **Spektrum** LIVE zum Vorteilspreis

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus



FREISTETTERS FORMELWELT PI UND DIE EXPERIMENTAL- MATHEMATIK

Eigentlich ist das Experimentieren mit realen Gegenständen nicht Sache der Mathematik. Aber manchmal eben doch ...

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.
» spektrum.de/artikel/1594006

Im Jahr 1733 stellte der französische Naturforscher Georges-Louis Leclerc de Buffon vor der Pariser Akademie der Wissenschaften eine Frage, die mathematischer Natur ist, obwohl der erste Anschein dem widerspricht: Auf einen Fußboden, der aus lauter parallelen, gleich breiten Holzplanken besteht, werfe man zufällig eine Nadel. Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie über einer der Ritzen zwischen den Planken zu liegen kommt?

Hintergrund der Frage war ein Glücksspiel der damaligen Zeit, bei dem man Münzen auf den Dielenboden warf und darauf wettete, ob sie eine der Ritzen berührten oder nicht. Bei der mathematischen Beschäftigung mit der Frage stieß Buffon auf einen interessanten Zusammenhang:

$$\pi \approx \frac{2\ell N_A}{d N_C}$$

Was will uns die Formel sagen? Wenn man Nadeln der Länge ℓ nimmt, die kleiner als der Abstand d zwischen den Ritzen sein muss, eine große Anzahl N_A von ihnen auf den Boden wirft und die Anzahl N_C derjenigen bestimmt, die eine der Trennlinien berühren, dann ergeben diese Werte, in die Formel eingesetzt, eine Annäherung an die berühmte Kreiszahl $\pi = 3,14159265...$

Je mehr Würfe man durchführt, desto genauer wird die Approximation, und im Grenzfall unendlich vieler Würfe gibt die Formel die Kreiszahl π exakt wieder. Das Ergebnis ist zunächst überraschend. Was haben zufällig am Boden verteilte Nadeln mit dem Verhältnis von Umfang zu Durchmesser eines Kreises zu tun, wo doch weit und breit kein Kreis in Sicht ist?

Man kommt der Lösung des Rätsels näher, wenn man bedenkt, dass es auf den Winkel zwischen der gefallenen Nadel und der Ritze ankommt, genauer: auf den Kosinus dieses Winkels. Alle Winkel sind gleich wahrscheinlich, man muss alle Fälle gewissermaßen aufsummieren (integrieren), und wenn man eine Winkelfunktion integriert, stößt man bald auf π .

Mit der Formel ist es also möglich, den Wert von π experimentell zu bestimmen. Und tatsächlich hat man das getan. 1850 warf der Schweizer Astronom Rudolf Wolf 5000 Nadeln und erhielt dabei einen Wert für π von 3,1596 – keine sonderlich gute Annäherung, da nur eine Nachkommastelle korrekt ist. Buffons Nadelmethode funktioniert zwar, ist aber enorm unpraktisch. Man müsste Unmengen an Nadeln werfen, um auch nur ein paar richtige Nachkommastellen zu gewinnen.

Was in der echten Welt so gut wie unmöglich ist, wäre mittlerweile problemlos zu simulieren. Man kann ohne Weiteres einen Computer darauf programmieren, Hunderttausende oder Millionen Nadeln in kürzester Zeit virtuell zu werfen und die Ergebnisse auszuzählen. Aber zur numerischen Berechnung von π verwenden die Mathematiker heute andere, bessere Methoden, für die sie noch nicht einmal virtuell experimentieren müssen.

Ohne Nutzen waren Buffons Gedanken dennoch nicht. Seine Überlegungen zur zufälligen Verteilung von Nadeln führten im 20. Jahrhundert zur Entwicklung der so genannten Monte-Carlo-Simulationen (**Spektrum** Februar 2012, S. 88). Viele Gleichungen lassen sich exakt gar nicht und selbst angenähert nur unter sehr großem Aufwand lösen. Stattdessen kann man numerische Methoden und die Wahrscheinlichkeitsrechnung nutzen, um aus einer großen Zahl an Zufallsexperimenten eine Näherungslösung zu konstruieren, so wie es bei Buffons Nadeln und der Zahl π funktioniert.

Monte-Carlo-Simulationen werden heute verwendet, um Wetter- und Klimamodelle zu berechnen oder andere komplexe Prozesse nachzubilden, die sich mathematisch nicht auf anderem Weg analysieren lassen. Astronomen benutzen sie ebenso wie Mediziner oder Finanzmarktanalysten. Und natürlich verwenden auch Mathematiker die Monte-Carlo-Methode. Nur echte Nadeln werfen sie dabei meistens nicht.

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN DIE BUNTE WELT DER AZOFARBSTOFFE


Azoverbindungen verleihen Lebensmitteln, Kleidungsstücken und vielen anderen Produkten intensive Farben. Doch sie bergen auch gesundheitliche Risiken.



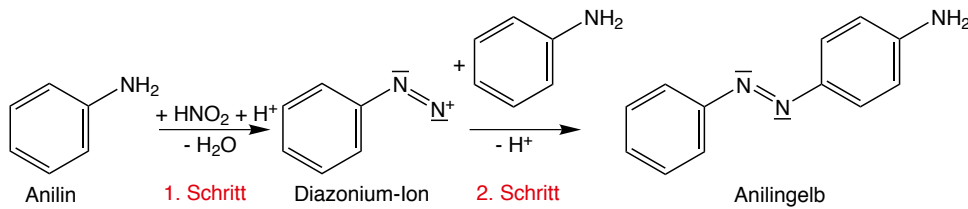
Matthias Ducci ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

» spektrum.de/artikel/1594008

MARIUSZ_PRUSACZYK / GETTY IMAGES / ISTOCK

A large photograph showing several large, woven burlap sacks filled with various spices. The foreground is dominated by a bright red powder, likely paprika, which is overflowing from a sack. In the background, other sacks contain yellow and white powders. The scene is brightly lit, highlighting the textures and colors of the spices.

Azofarbstoffe können auch in orientalischen Gewürzen enthalten sein. Mitunter sind die Zusätze jedoch giftig.



Bei der Synthese von Anilinelb überführt man Anilin mit Hilfe von Salpetriger Säure (HNO_2) zunächst in ein Diazonium-Ion und koppelt dieses dann an ein weiteres Anilinmolekül (Azokupplung).

► Azofarbstoffe gehören zu den synthetischen Farbstoffen. Das heißt, sie kommen in der Natur nicht vor, sondern der Mensch hat sie »erfunden«. Um ihre Entwicklung nachzuvollziehen, muss man etwas in die Wissenschaftsgeschichte eintauchen.

Im Zuge der industriellen Entwicklung Englands wurden im 17. und 18. Jahrhundert in Schottland und Irland große Waldflächen gerodet. Das Holz benötigte man zum einen für den Schiffsbau und zum anderen für die Produktion von Holzkohle, um damit in Hochöfen aus Erz Eisen zu gewinnen. Irgendwann ging der Rohstoff zur Neige, und es bedurfte eines Holzkohleersatzes für die Eisenverhüttung. Die Wahl fiel auf Steinkohle, die in nahezu unerschöpflicher Menge vorhanden war. Allerdings musste zunächst ein Verfahren entwickelt werden, um den in ihr enthaltenen Schwefel zu entfernen, der das Eisen spröde und damit unbrauchbar macht. Abraham Darby II schaffte dies 1735 mit der Erfindung der Verkokung, bei der sich Steinkohle unter Luftabschluss bei 1100 bis 1300 Grad Celsius zersetzt. Neben dem so genannten Koks entstehen dabei verschiedene Gase, vor allem Methan und Wasserstoff, sowie große Mengen an Steinkohleteer. Durch Zufall entdeckten die Arbeiter einer Kokerei, dass die gasförmigen Abfallprodukte brennbar sind, und nutzten diese fortan, um ihre Arbeitsstätte zu beleuchten. Die Anwendung machte rasch Schule; Gaslaternen und später Gasöfen verbreiteten sich weltweit. Für die Unmengen an Teer gab es hingegen keine sinnvolle Verwendung, und man verklappte deshalb die zähflüssige schwarze Masse zum Teil im Meer, was zu ökologischen Problemen führte.

Im Jahr 1834 gelang es dem deutschen Chemiker Ferdinand Friedlieb Runge, aus ebendiesem Steinkohleteer die organischen Verbindungen Anilin, Phenol und Pyrrol zu isolieren. Indem er das Anilin oxidierte, erzeugte er eines der ältesten Farbstoffe: Anilinschwarz. Er entdeckte noch weitere Farbstoffe, ohne jedoch deren Zusammensetzung oder chemische Strukturen zu kennen. Runge's Forschung blieb allerdings unbeachtet, da seinerzeit kein Bedarf an synthetischen Farbstoffen bestand. Ein weiterer Zufallstreffer gelang 1856 dem damals erst 18-jährigen Briten William Henry Perkin. Dieser wollte das Malaria-mittel Chinin künstlich herstellen, weil die natürlichen Ressourcen (die Rinde des Chinabaums) nicht ausreichten, um Großbritanniens Kolonialarmeen zu versorgen. Bei seiner unsystematischen Suche nach einem Syntheseweg stieß Perkin auf eine purpurviolette Verbindung, die er Mauvein nannte. Sie wurde zur Modifarbe und war der erste industriell produzierte Farbstoff.

Mitte des 19. Jahrhunderts schafften August Kekulé und andere die theoretischen Grundlagen der organischen

Chemie, was die gezielte Suche nach neuen Farbstoffen erlaubte. 1860 entdeckte der in England als Brauereichemiker arbeitende Deutsche Peter Griess die so genannten Diazoverbindungen und legte damit den Grundstein für die heute größte Klasse synthetischer Farbstoffe: die Azofarbstoffe. Als ersten Vertreter dieser Gruppe nennen manche Quellen das von Carl Alexander von Martius entwickelte Bismarckbraun, das heute noch in der Leder-, Papier- und Holzfärberei sowie in der Mikrobiologie zum Färben von Bakterien verwendet wird. Mit Hilfe dieser Substanz konnte Robert Koch den wichtigsten Erreger der Tuberkulose nachweisen. Martius gründete später zusammen mit Paul Mendelssohn Bartholdy die »Actien-Gesellschaft für Anilin-Fabrication« (Agfa), die zunächst eine reine Farbenfabrik war.

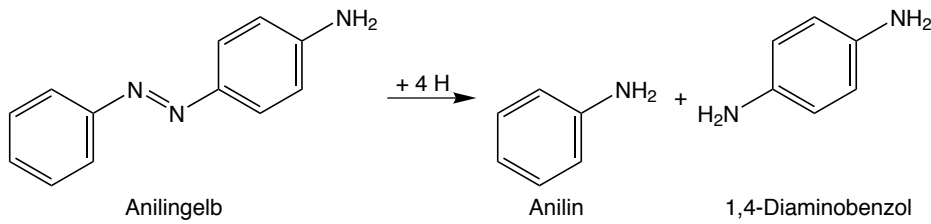
Keimzelle der Chemieindustrie

Andere Quellen wiederum erwähnen Anilinelb als den ersten synthetischen Azofarbstoff, das sich bei der Reaktion von Anilin mit Salpetriger Säure bildet (siehe oben). Dabei entsteht zunächst eine sehr reaktive so genannte Diazoniumverbindung, die sich anschließend mit einem zweiten Anilinmolekül zu dem Farbstoff verbindet (Azokupplung).

Gemeinsames strukturelles Merkmal aller Azofarbstoffe ist die Azobrücke: $R_1-N=N-R_2$ (R_1 und R_2 stehen für »aromatische« ringförmige Kohlenwasserstoffe, N für Stickstoff). Diese ist maßgeblich für die Farbigkeit solcher Verbindungen und wird daher auch als chromophore Gruppe bezeichnet (griechisch: chroma = Farbe; phoros = tragend).

Im Jahr 1884 meldete der deutsche Chemiker Peter Böttiger das Patent für die Herstellung des ersten Bisazofarbstoffs – Kongorot – an, der zwei Azogruppen enthält. Chemiker synthetisierten nun immer mehr Azofarbstoffe. In puncto Herstellung, Verarbeitung und Farbechtheit stellten sie alle bis dahin bekannten Farbstoffe in den Schatten, und es fanden sich vielfältige Anwendungsgebiete. Sie trugen maßgeblich dazu bei, dass zu jener Zeit eine eigenständige chemische Industrie entstand. Viele Firmen, die später zu großen Pharma- und Chemieunternehmen wurden, wie zum Beispiel die »Badische Anilin- und Sodafabrik« (BASF), starteten als Farbstoffproduzenten. Heinrich Caro, der erste technische Direktor der BASF, schrieb über die Azofarbstoffe:

»Alle diese durch das Band der Azogruppe vereinigten Gebilde sind Farbstoffe, Azofarbstoffe ohne Zahl, täglich sich mehrend, alle darstellbar durch die Anwendung derselben synthetischen Methode, welche an Vielseitigkeit ihrer praktisch verwertbaren Resultate, an Einfachheit, Glätte und Sicherheit ihrer Handhabung von keiner anderen in der Farbstoffchemie erreicht, geschweige denn



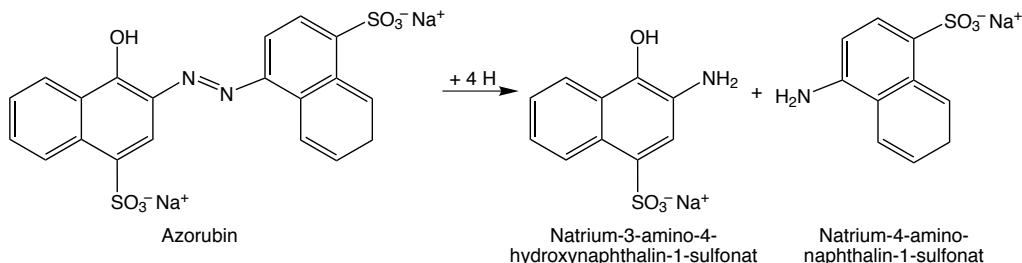
Gelangt Anilingelb über Haut, Atemwege oder durch Verschlucken in den Körper, spalten dort siedelnde Bakterien das Molekül in giftiges Anilin und 1,4-Diaminobenzol.

übertroffen wird, sie besteht in der Einwirkung von Diazo-Verbindungen auf aromatische Amine und Phenole.«

Deutsche Firmen waren einst weltweit führend in der Herstellung von Farbstoffen; 1913 lag ihr Anteil an der globalen Produktion bei 87 Prozent.

Azofarbstoffe lassen sich ganz allgemein in lösliche Azofarbstoffe und unlösliche Azopigmente einteilen. Bei Ersteren unterscheidet man des Weiteren zwischen wasserlöslichen (hydrophilen) und fettlöslichen (lipophilen) Verbindungen. Sie kommen in einer Vielzahl von Produkten vor, unter anderem in Lebensmitteln, Kosmetika, Textilien, Tattoofarben, Plastik- und Gummiprodukten, Pharmazeutika, Insektiziden, Lacken, Druckerpatronen sowie in Indikator- und Färbungslösungen für chemische Laboratorien. Der Hauptanteil der produzierten Azofarbstoffe entfällt auf die Textilindustrie; die größten Produzenten sind heute China, Indien, Korea, Taiwan und Argentinien.

In den letzten Jahren gerieten Azofarbstoffe zunehmend in Verruf. Denn neben nützlichen und unbedenklichen Vertretern dieser Stoffklasse gibt es eine ganze Reihe potenziell gefährlicher. Weltweit sind zirka 1000 Azoverbindungen im Umlauf, von denen rund die Hälfte möglicherweise Krebs erregende Eigenschaften besitzen. Ob beziehungsweise in welchem Maß diese in Deutschland in Konsumprodukten stecken, ist unklar. Zwar existieren in der EU entsprechende gesetzliche Vorschriften zur Verwendung von Azofarbstoffen. Doch angesichts der voranschreitenden Globalisierung mit immer komplexeren Handels- und Produktionswegen ist eine umfassende Nachverfolgung und Kontrolle kaum möglich. Um als gesundheitsgefährdend eingestufte Produkte aus dem Handel fernzuhalten, hat die EU ein Frühwarnsystem installiert (Rapid Alert System for dangerous non-food products, RAPEX). Allerdings werden mögliche Gefährdungen durch bestimmte Waren oft erst nach Handelseintritt bekannt, wenn etliche Produkte bereits verkauft wurden. Gerade in der Textilindustrie kommt es wegen Profitgier, mangelnder Kontrollen oder fehlender Richtlinien in den Produktionsländern immer wieder zu Rückrufaktionen von Kleidungsstücken, die mit verbotenen Chemikalien gefärbt sind.



Azorubin ist ungiftig und als Lebensmittelfarbstoff zugelassen. Auf Grund der Sulfonatgruppen sind die Spaltprodukte gut wasserlöslich, so dass der Körper sie schnell wieder ausscheidet.

Was unterscheidet harmlose und gefährliche Azofarbstoffe? Und was macht Letztere so gefährlich? Krebs erregende Stoffe – chemische Mutagene – können das Erbgut bestimmter Zellen verändern. Besonders bei Mutationen, die das Wachstum und das Absterben Gewebe bildender Zellen steuern, kann das schwer wiegende Folgen haben. Führt die genetische Veränderung zu unkontrolliertem Zellwachstum, entsteht ein Tumor. Lösliche Azofarbstoffe entfalten ihre kanzerogene Wirkung meist durch eine so genannte reduktive Spaltung der Azobrücke, bei der sich aromatische Amine bilden. Das obige Schema illustriert die Freisetzung solcher Amine am Beispiel des nachweislich Krebs erregenden Azofarbstoffs Anilingelb.

Vorsicht bei kulinarischen Souvenirs mit knalligen Farben!

Die Aufspaltung (Reduktion) der Moleküle im Körper ist auf die Eigenschaft der Azobrücke zurückzuführen, Elektronen besonders stark anzuziehen, und erfolgt durch Bakterien, die sich in Darm, Leber oder Haut befinden. Die Zersetzungsprodukte des Anilingelbs, Anilin und 1,4-Diaminobenzol, haben es in sich: Sie sind giftig beim Verschlucken, Einatmen und bei Hautkontakt. Beide Stoffe können zudem allergische Hautreaktionen verursachen. Anilin kann bei längerer oder wiederholter Exposition die Organe schädigen und vermutlich genetische Defekte sowie Krebs erzeugen.

Neben diesen toxischen Verbindungen gibt es völlig harmlose Azofarbstoffe, von denen einige sogar als Lebensmittelfarbstoffe zugelassen sind. Sie verweilen nicht lange im menschlichen Körper, sondern werden mit dem Urin schnell wieder ausgeschieden, weil sie auf Grund von Sulfonatgruppen ($-\text{SO}_3^-$) an den Aromaten gut wasserlöslich sind. Ein Beispiel hierfür ist der Lebensmittelfarbstoff Azorubin (E 122).

Azopigmente können über die Lunge oder den Magen-Darm-Trakt in den Körper gelangen – da sie unlöslich sind, können Bakterien sie jedoch nicht in Amine aufspalten. Lösliche Azofarbstoffe nehmen den gleichen Weg, etwa als harmlos eingestufte Lebensmittelfarben. Doch auch Krebs erregende Verbindungen werden bisweilen unwissentlich oral aufgenommen: Amtliche Lebensmittelkontrol-



Das Getränk »Powerade Wild Cherry« enthält den Farbstoff Azorubin (links). Mit stark reduzierendem Natriumdithionit ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) lässt sich die Verbindung in farblose Moleküle zerlegen (Mitte), die unter UV-Licht intensiv blau fluoreszieren (rechts).

len haben ergeben, dass derartige Stoffe in Mitbringsele aus dem Urlaub enthalten sein können. So hat man Sudanrot in indischen Chilierzugnissen nachgewiesen sowie Buttergelb in Currygewürzen und Nitroanilinrot in Paprikapulver gefunden, mitunter in erheblichen Dosen: Bei einer Probe kamen auf ein Kilogramm ganze vier Gramm Sudanrot. Es soll die Frische des Lebensmittels vortäuschen, gilt aber wie die übrigen Verbindungen als karzinogen und ist in der EU als Lebensmittelzusatz verboten.

Lösliche Azofarbstoffe können darüber hinaus über die Haut aufgenommen werden, etwa beim Tragen von mit Azofarbstoffen gefärbten Textilien. Bunte Kleidungsstücke enthalten durchschnittlich einen Farbanteil zwischen 0,25 und 3,5 Prozent, bei Lederprodukten können es bis zu 7 Prozent sein. Schweiß und Reibung können die Farbmoleküle aus Textilfasern herauslösen, so dass sie auf der Haut oder an den Haaransätzen haften bleiben. In Versuchen ließen sich die Azofarbstoffe selbst durch intensives Waschen nicht restlos entfernen.

Die Aufnahme über die Haut ist unter anderem abhängig von der Polarität der Moleküle. Auf der Haut siedelnde Mikroorganismen können Farbstoffe abbauen, vor allem wenn diese wasserlöslich sind. Sie spalten die Moleküle in die jeweiligen aromatischen Amine, die dann über die Haut in den Blutkreislauf und schließlich in die Leber gelangen können, die sie weiter verstoffwechselt. Beim Abbau des Azofarbstoffs Direct Blue 14 etwa, der in der Textilindustrie häufig eingesetzt wird, entsteht in der Leber o-Tolidin, das im Verdacht steht, Krebs zu verursachen. Fettlösliche Azoverbindungen nimmt der Körper meist unverändert auf, entweder über die Haut oder durch Diffusion entlang der Haarwurzeln. Sie werden in bestimmten Zellen der Oberhaut wie den Keratinozyten oder in der Leber in Amine gespalten. Auch wer sich tätowieren lässt, kann dadurch Azopigmente aufnehmen. Gesundheitlich problematisch ist jedoch eher das laserchirurgische Entfernen unliebsam gewordener Tätowierungen, da aus den Pigmenten hierbei freie Amine werden.

Die reduktive Spaltung von Azofarbstoffen lässt sich in einem einfachen Experiment mit Haushaltsprodukten nachvollziehen. Gut eignet sich dafür das Erfrischungsgetränk »Powerade Wild Cherry«, das rotes Azorubin enthält. (Für diesen und andere Farbzusätze gilt seit 2010 eine Kennzeichnungspflicht entsprechender Lebensmittel mit dem Hinweis: »Kann Aktivität und Aufmerksamkeit bei Kindern beeinträchtigen.«) Man füllt zirka 20 Milliliter des Getränks in ein Glasgefäß und gibt ein Reduktionsmittel dazu, das die Azoverbindung spaltet. Hierfür eignet sich zum Beispiel der »Power-Entfärber Intensiv« von Heitmann auf Grund seines etwa 30-prozentigen Anteils an stark reduzierend wirkendem Natriumdithionit ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$). Davon gibt man eine Spatelspitze in die rote Flüssigkeit und rührt diese mit einem Glasstab um: Die Lösung entfärbt sich rasch (je nach Flüssigkeitsmenge benötigt man gegebenenfalls etwas mehr Entfärber).

Offensichtlich ist eine chemische Reaktion unter Beteiligung der farbgebenden chromophoren Azogruppe abgelaufen. Eine genaue Untersuchung der Reaktionsprodukte zeigt, dass es tatsächlich zu einer reduktiven Spaltung von Azorubin kam, bei der die auf S. 70 abgebildeten aromatischen Amine entstanden. Bestrahlt man die entfärbte Lösung im Dunklen mit UV-Licht einer Wellenlänge von 365 Nanometern, leuchtet die Lösung intensiv blau. Diese Eigenschaft lässt sich auf die fluoreszierenden 4-Aminonaphthalin-1-sulfonat-Anionen zurückführen. ◀

QUELLEN

Ducci, M.: Azofarbstoffe in Gummibärchen – aus Blau wird Gelb. In: Nachrichten aus der Chemie 65, S. 924–927, 2017

Ducci, M. et al.: Azofarbstoffe in Textilien. In: CHEMKON 22, S. 111–118, 2015

Krätz, O.: 7000 Jahre Chemie. Nikol, Hamburg, 1999

Petersen, H., Roth, K.: To Tattoo or not to Tattoo. In: Chemie in unserer Zeit 50, S. 44–66, 2016

INFORMATIK

SPIELEND LERNEN

Die neuesten Versionen künstlicher Intelligenz wachsen ohne einprogrammiertes Vorwissen innerhalb weniger Stunden zu Weltklassespielern heran. Nun versuchen Forscher diese Systeme über das Spielbrett hinaus auf Probleme in Alltag und Wissenschaft anzuwenden – was nach wie vor knifflig ist.



Joshua Sokol ist Wissenschaftsjournalist in Boston. Er machte seinen Bachelor am Swarthmore College in Astronomie und englischer Literatur und seinen Master am Massachusetts Institute of Technology in wissenschaftlichem Schreiben. Dazwischen arbeitete er als Datenanalyst am Hubble-Weltraumteleskop.

► [spektrum.de/artikel/1594010](https://www.spektrum.de/artikel/1594010)

► Als Maschinen erstmals die talentiertesten Meister übertrafen, mussten sie dazu noch von Menschen erlangtes Wissen nutzen. Beispielsweise hatten Ingenieure von IBM ihren Computer Deep Blue, der 1997 den ehemaligen Schachweltmeister Garri Kasparow schlug, zuvor mit jahrhundertelanger Schacherfahrung gespeist. Auch AlphaGo, das Googles Tochterunternehmen DeepMind entwickelt hat, verfügte über Millionen verschiedener Züge aus Zehntausenden von Menschen gespielten Go-Partien, als es den koreanischen Profi Lee Sedol besiegte.

Doch nun überdenken Informatiker die Art und Weise, wie Programme das vorhandene menschliche Wissen einsetzen sollen. Der aktuelle Trend lautet, es schlicht zu ignorieren.

Im Oktober 2017 veröffentlichte das DeepMind-Team ein neues Go-System, AlphaGo Zero, das überhaupt keine menschlichen Spiele mehr studierte. Stattdessen lernte es lediglich die Regeln und trat gegen sich selbst in den Kampf. Die ersten Züge des Bots erfolgten dabei völlig zufällig. Nach jedem Spiel lernte die Maschine aber, was einen Sieg begünstigt und was nicht. Am Ende des Trainings stieg AlphaGo Zero gegen seinen Vorläufer AlphaGo in den Ring. Die selbstlernende Maschine gewann das Turnier mit dem sensationellen Ergebnis von 100 zu 0 (siehe **Spektrum** Januar 2018, S. 22).

In immer komplexeren Spielumgebungen übertreffen Computerprogramme ihre menschlichen Gegner. Dies gelingt ihnen inzwischen sogar größtenteils ohne jedes Vorwissen. Allerdings bereiten ihnen alltägliche Situationen wie das Autofahren große Probleme. Menschen sind ihnen in diesen Bereichen noch immer überlegen.



LIGHTFIELDSTUDIOS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Das Team entwickelte daraufhin AlphaGo Zero weiter, um erneut einen autodidaktischen Meisterspieler zu konstruieren, den sie der Einfachheit halber nur noch AlphaZero nannten. Und auch diese Version übertraf ihren Vorgänger – sie schlug den Bot, der den Bot schlug, der die besten Go-Spieler der Welt schlug. Anders als seine Vorgänger ist AlphaZero nicht nur auf Go spezialisiert. Als es die Regeln für Schach oder die japanische Schachvariante Shogi erhielt, besiegte das Programm innerhalb kürzester Zeit die dafür maßgeschneiderten Top-Level-Algorithmen. Experten staunten über den aggressiven und ungewöhnli-

chen Stil des Programms. »Ich habe mich immer gefragt, wie es wäre, wenn eine überlegene Spezies auf die Erde käme und uns zeigen würde, wie sie Schach spielt«, sagte der dänische Großmeister Peter Heine Nielsen in einem BBC-Interview. »Jetzt weiß ich es.«

Im Jahr 2017 verließen diese futuristisch anmutenden Programme die karierten Spielbretter und begannen plötzlich die unterschiedlichsten Spielumgebungen zu erobern, wie Poker oder Dota 2. Letzteres ist ein äußerst beliebtes Online-Multiplayer-Spiel, in dem Fantasy-Helden um die Kontrolle über eine fremde Welt kämpfen.



Natürlich wollen Unternehmen wie IBM und Google nicht bloß Videospiel-Turniere gewinnen. Die Forscherteams hoffen, ihre Methoden künftig auch auf reale Probleme anwenden zu können, um etwa Raumtemperatur-Supraleiter zu realisieren oder zu verstehen, wie man Proteine für die Medikamentenentwicklung falten muss.

Allerdings ist noch nicht klar, inwiefern die Technik über eine Spielumgebung hinauswachsen kann. »Ich bin mir nicht sicher, ob sich die Ideen von AlphaZero so einfach verallgemeinern lassen«, sagt Pedro Domingos, Informatiker an der University of Washington. »Spiele sind immerhin eine sehr spezielle Angelegenheit.«

Perfekte Ziele für eine unvollkommene Welt

Bei Schach oder Go kennen die Spieler jederzeit die Positionen aller Figuren auf dem Brett: Sie verfügen stets über eine »perfekte Information«. Egal wie kompliziert es wird, der Spieler muss lediglich von der aktuellen Situation ausgehend weiterdenken.

Bei Alltagsproblemen sieht das aber meist anders aus. Wie wäre es, wenn ein Computer plötzlich Krankheiten diagnostizieren oder Geschäftsverhandlungen führen müsste? »Die meisten strategischen Zusammenspiele in der realen Welt enthalten versteckte Informationen«, sagt Noam Brown, ein Doktorand in Informatik an der Carnegie Mellon University in Pittsburgh. »Ich habe das Gefühl, als würde die Mehrheit der KI-Gemeinschaft das vernachlässigen.«

Brown hat sich auf Poker spezialisiert, das eine größere Herausforderung bietet. Denn dabei sieht ein Spieler nur seine eigenen Karten und nicht die seiner Gegner. Doch auch hier übertreffen Maschinen inzwischen den Menschen. Im Januar 2017 trat ein Programm namens Libratus, das Brown zusammen mit seinem Betreuer Tuomas Sandholm entwickelt hat, gegen vier professionelle Pokerspieler bei der Heads-Up Championship in Las Vegas an.

Am Ende des 20-tägigen Turniers hatte Libratus einen Vorsprung von 1,7 Millionen Dollar vor seinen menschlichen Konkurrenten.

Das überaus beliebte Online-Multiplayer-Spiel StarCraft II ist für eine Maschine noch komplizierter: Die Spieler wählen ein Team, bauen eine Armee auf und bekämpfen sich in einer düsteren Sciencefiction-Landschaft, die in einen Nebel gehüllt ist, so dass sie nur die Bereiche sehen können, in denen ihre Soldaten oder Gebäude stehen.

Bei StarCraft II ist eine künstliche Intelligenz (KI) dem Menschen immer noch deutlich unterlegen. Pro Minute fallen bei einem professionellen Turnier über 250 Züge an – die besten Spieler tätigen sogar bis zu 400 Aktionen in einer Minute. Bei jedem dieser Klicks müssen sie eine unvorstellbare Menge möglicher Ausgänge berücksichtigen. Das überfordert derzeitige Bots. Doch seit August 2017 kooperiert die Herstellerfirma von StarCraft II, Blizzard Entertainment, mit den Forschern von DeepMind. Die Entwickler wollen das Spiel für die Wissenschaftler zugänglicher gestalten.

Trotz aller Schwierigkeiten hat StarCraft II jedoch ein einfaches Ziel: Besiege deinen Feind. Das hat es mit Schach, Go, Poker, Dota 2 und vielen anderen Spielen gemeinsam. Eine solche Aufgabe programmieren Entwickler in Form einer »Zielfunktion« ein. Um AlphaZero das Schachspiel beizubringen, verbuchten die Informatiker einen Verlust als minus eins, Unentschieden als null, und ein Sieg entsprach einer eins. Das Ziel der künstlichen Intelligenz bestand darin, die Punktzahl zu maximieren. Die Zielfunktion eines Poker-Bots lässt sich genauso einfach definieren: Gewinne möglichst viel Geld.

Alltägliche Situationen sind dagegen weitaus komplexer. Die Zielfunktion eines selbstfahrenden Wagens ähnelt beispielsweise einem sorgfältig vorformulierten Wunsch, dem man einem Flaschengeist gegenüber äußern würde: Bringe den Fahrgast unverzüglich an den richtigen Ort; halte dabei alle Gesetze ein, und wäge in gefährlichen Situationen den Wert menschlichen Lebens angemessen ab. Wie präzise ein Wissenschaftler die Zielfunktion definiert, sagt Domingos, »unterscheidet einen großen KI-Forscher von einem durchschnittlichen«.

Eine nicht genau durchdachte Zielfunktion kann nämlich zu unerwünschtem Verhalten führen. Der Twitter-Chatbot Tay, den Microsoft am 23. März 2016 startete, ist ein Beispiel dafür. Tays Ziel war es, möglichst viele Menschen im sozialen Netzwerk einzubinden – und das gelang ihm auch. »Leider hat Tay herausgefunden, dass er das menschliche Engagement maximiert, wenn er rassistische Beleidigungen ausspuckt«, erklärt Domingos. Microsoft schaltete den Chatbot weniger als einen Tag später wieder ab.

Aber wie bringt sich eine künstliche Intelligenz selbst etwas bei? Die Strategien beruhen oft auf der Methode des »verstärkenden Lernens« (reinforcement learning). Anstatt einem Algorithmus detaillierte Anweisungen zu übergeben, lassen ihn die Ingenieure eine Umgebung allein erkunden. Auf diese Weise lernt die Maschine, ihre Ziele durch Ausprobieren zu erreichen.

AUF EINEN BLICK DIE GRENZEN DER KI

- 1** Auf dem Spielbrett machen Roboter immer größere Fortschritte. Inzwischen schlagen die Algorithmen menschliche Weltklassespieler sogar ohne jegliches Vorwissen, das ihnen einprogrammiert wäre.
- 2** Speziell die Methode des »verstärkenden Lernens« hat zu großen Erfolgen geführt. Dabei verbessert ein Programm seine Strategie, indem es wiederholt gegen sich selbst antritt.
- 3** Doch die Anwendungsgebiete außerhalb des Spielbretts bleiben begrenzt: Hoffnungen, die Algorithmen etwa für individuelle Krebsbehandlungen zu nutzen, blieben bislang unerfüllt.



Der professionelle südkoreanische Go-Spieler Lee Sedol während eines Turniers im März 2016 gegen das Computerprogramm AlphaGo. Sedol verlor vier von fünf Partien gegen seinen futuristischen Gegner.

Noch vor AlphaGo und seinen Nachfolgern erzielte das DeepMind-Team durch verstärkendes Lernen erstmals ein sensationsträchtiges Ergebnis: Es entwickelte 2013 einen Bot, der sieben Spiele auf der Videokonsole Atari 2600 ohne fremde Hilfe zu beherrschen lernte – drei davon sogar auf Expertenniveau.

Die Entwicklung setzt sich heute fort: Anfang Februar 2018 veröffentlichte DeepMind das KI-System IMPALA, das nicht nur 57 Spiele auf einem Atari 2600 bewältigt, sondern auch 30 weitere von DeepMind entwickelte Anwendungen meistert. In diesen streift der Spieler durch verschiedene dreidimensionale Umgebungen und öffnet Türen oder sammelt Pilze. IMPALA scheint aufgabenübergreifend zu lernen, so dass es während eines Spiels auch die für andere Spiele benötigten Fähigkeiten verbessert.

Der eigene schlimmste Feind

Neben diesen Einzelspiel-Anwendungen eignet sich das verstärkende Lernen überaus gut, um Bots für Brett- und Multiplayer-Spiele zu trainieren, indem sie wiederholt gegen sich selbst antreten. Durch den Wettkampf gegen die eigene Kopie, das so genannte Selbstspiel, entwickeln die Maschinen immer bessere Gewinnstrategien.

In jedem Selbstspiel trifft ein Algorithmus auf einen gleichwertigen Gegner. Wechselt die Maschine ihre Strategie, führt das zu einem anderen Ergebnis, und das Programm bekommt sofort Feedback. »Immer wenn du etwas lernst oder eine Kleinigkeit entdeckst, setzt dein Gegner das sofort gegen dich ein«, sagt Ilya Sutskever, Forschungsdirektor von OpenAI. Dieser gemeinnützige Verein, den Elon Musk mit anderen Investoren gegründet hat, widmet sich der Entwicklung und dem Austausch von KI-Technologie. Im August 2017 veröffentlichte die Organisation ein Programm, das im Spiel Dota 2 die Rolle des dämonischen Nekromanten »Shadow Fiend« übernimmt –

und selbst die weltbesten menschlichen Spieler in Einzelkämpfen besiegt.

Die Idee des Selbstspiels reicht bereits Jahrzehnte zurück. »Es ist fast wie ein Blick in die Vergangenheit, nur mit mehr Rechenpower«, sagt David Duvenaud, ein Informatiker an der University of Toronto. Schon in den 1950er Jahren entwickelte der IBM-Ingenieur Arthur Samuel ein Programm für das Spiel Dame, bei dem der Computer in jedem Zug die Gewinnchancen beider Seiten abglich und aus den Ergebnissen lernte. 40 Jahre später programmierte Gerald Tesauro, der ebenfalls bei IBM arbeitet, einen Backgammon-Bot, der sich selbst bekämpfte. Durch seine ungewöhnlichen Strategien erreichte der Algorithmus schon damals das Niveau menschlicher Experten.

Die Methode des Selbstspiels macht aber nur einen Aspekt moderner Bots aus. Die Maschinen müssen darüber hinaus ihre Erfahrungen verarbeiten. Spiele wie Schach, Go oder Dota 2 haben weit mehr mögliche Verläufe, als es Atome im Universum gibt. Selbst während der schier zahllosen Durchgänge, in denen ein Programm seinen eigenen Zwilling bekämpft, kann es nicht jedem möglichen Szenario begegnen – geschweige denn jedes davon in einer Tabelle abspeichern, um dort später in der gleichen Situation nachsehen zu können.

In diesem Meer aus Möglichkeiten kann man sich nur über Wasser halten, indem »man verallgemeinert und das Wesentliche einfängt«, sagt Pieter Abbeel, Informatiker an der University of California in Berkeley. In den 1990er Jahren löste IBM das Problem bei Deep Blue über eine eingebaute Schachformel. Stieß der Computer auf eine unbekannt Situation, wägte er die weiteren Spielzüge entsprechend gewissen Parametern ab, etwa indem es die Sicherheit des Königs dem Raumvorteil im Zentrum gegenüberstellte. In den letzten Jahren hat eine neue Technik die vorab eingebauten Formeln völlig überflüssig gemacht. »Plötzlich fängt das ›tiefe Netz‹ all das ein«, sagt Abbeel.

Tiefe neuronale Netze sind aus Schichten künstlicher »Neurone« aufgebaut, die sich wie Pfannkuchen stapeln. Wenn die künstlichen Neurone ihre Signale in eine Schicht feuern, sendet diese sie an die nächste Schicht weiter, die sie wiederum an die nächste Schicht leitet, und so fort.

Indem Entwickler die Verbindung zwischen den Ebenen anpassen, können die tiefen neuronalen Netze Eingangssignale in sinnvolle Ausgangsdaten umwandeln – selbst wenn ihr Zusammenhang oftmals auf den ersten Blick abstrakt wirkt. Dazu speist man zunächst das neuronale Netz mit einer großen Menge an Beispielen aus dem relevanten Gebiet, etwa Übersetzungen. Übergibt man ihm dann etwa einen englischen Satz, kann es den nach der Trainingsphase ins Türkische übersetzen – auch wenn das Programm diesen Satz nie zuvor gesehen hat. Füttert man das Netz stattdessen mit Bildern aus Tierheimen, kann es erkennen, in welchen Einrichtungen Katzen leben. Oder man zeigt dem Algorithmus ein Spielbrett, und es schätzt die Gewinnchancen einer Seite ein. Je mehr Beispiele das Programm im Vorfeld erhält, desto besser fallen die Vorhersagen aus.

Tiefe neuronale Netze lassen sich sehr gut mit dem Selbstspiel verbinden, da die Algorithmen in ihrem Duell

gegen sich selbst Unmengen der benötigten Daten produzieren. Die tiefen Netzwerke können wiederum die in den Kämpfen auftretenden Muster verarbeiten.

Allerdings gibt es einen Haken. Damit die Maschinen nützliche Daten produzieren, brauchen sie eine möglichst realistische Spielumgebung. »Die vielen beeindruckenden Ergebnisse haben Forscher immer nur für Spezialfälle erzielt, bei denen man unsere Welt perfekt simulieren kann«, sagt Chelsea Finn, eine Doktorandin aus Berkeley. Sie nutzt künstliche Intelligenz, um Roboterarme zu steuern oder Daten sensibler Sensoren zu verarbeiten.

Die ersten Versuche mit den selbstlernenden Roboterarmen haben gezeigt, dass die Systeme zwar grundlegende Bewegungen lernen können, dabei aber nicht alle haptischen Details erfassen. Um auch komplexere Aufgaben zu erfüllen, wie eine Flasche aufzuschrauben oder einen schwierigen chirurgischen Eingriff durchzuführen, benötigen die Programme noch immer menschliche Erfahrungen.

Das Leben außerhalb des Spielbretts

Auch bei autonomen Fahrzeugen gibt es nach wie vor Schwierigkeiten: Unter anderem fällt es ihnen schwer, mit schlechtem Wetter oder Radfahrern umzugehen. Außerdem haben sie Probleme damit, ungewöhnliche Situationen zu beherrschen, wie wenn ein Vogel direkt auf die Kamera des Autos zufliegt.

Für schwer zu simulierende Probleme eignet sich das Selbstspiel allein also nicht. »Es gibt einen großen Unterschied zwischen einem wirklich perfekten Modell der Umwelt und einem erlernten, geschätzten Modell – besonders wenn die Realität komplex ist«, erläutert Yoshua Bengio, ein Pionier der Erforschung neuronaler Netze an der Universität de Montréal.

Ein weiteres Beispiel dafür ist das IBM-Programm Watson, das 2011 den legendären Profi Ken Jennings in der US-amerikanischen Fernseh-Quizshow »Jeopardy!« schlug. Watson konnte die Hinweise des Moderators analysieren und sogar mit Wortspielen umgehen. Das zweitägige Spiel endete alles andere als knapp – das Computerprogramm hatte dreimal so viel Geld gewonnen wie sein menschlicher Gegner. »Ich für meinen Teil begrüße unsere neuen elektronischen Herren und Meister«, schrieb Jennings unter seine letzte Antwort.

Watson schien Fähigkeiten zu besitzen, die auch Menschen zur Lösung von Alltagsproblemen einsetzen. Es konnte eine Aussage aufnehmen, blitzschnell riesige Datenmengen durchstöbern, die relevanten Informationsschnipsel finden und sich auf eine Antwort festlegen. Doch selbst nach sieben Jahren stellt die Welt außerhalb von Spielumgebungen Watson weiterhin vor Herausforderungen. Ein Bericht der US-amerikanischen Gesundheitsplattform »Stat« ergab, dass die Erforschung und Gestaltung personalisierter Krebsbehandlungen, wofür Watsons Nachfolge-Modell Watson for Oncology gedacht war, der Maschine Probleme bereitet.

»Die Fragen in »Jeopardy!« sind einfacher, weil sie nicht viel gesunden Menschenverstand erfordern«, schrieb

Bengio, der mit dem Watson-Team zusammengearbeitet hat, um die beiden Fälle zu vergleichen. »Einen medizinischen Artikel zu verstehen, ist weitaus schwieriger. Hier ist noch viel Grundlagenforschung nötig.«

Auch wenn Spiele sehr speziell sind, gibt es dennoch einige Probleme in der Wissenschaft, denen sie ähneln. Das Team von DeepMind hat beispielsweise angedeutet, dass seine neuesten Entwicklungen schon bald Forschern dabei helfen könnten, Proteinfaltungen besser zu verstehen.

Schon lange versuchen Wissenschaftler herauszufinden, wie sich die verschiedenen Aminosäuren, aus denen ein Protein besteht, zu einer winzigen dreidimensionalen Figur formen, deren Funktion von ebendieser Form abhängt. Das Problem ist genauso knifflig wie Schach: Chemiker können einige Szenarien grob durchrechnen, aber es gibt so viele mögliche Konfigurationen, dass es hoffnungslos ist, sie alle zu untersuchen.

Doch was wäre, wenn die komplizierte Proteinfaltung als Spiel konfiguriert werden könnte? Das wurde bereits umgesetzt: Seit 2008 haben hunderttausende Menschen das Onlinespiel »Foldit« ausprobiert, bei dem die Stabilität und Machbarkeit der von ihnen gefalteten Proteinstrukturen bewertet wird. Eine Maschine könnte sich in ähnlicher Weise selbst trainieren, etwa indem sie versucht, ihre bisherige Bestmarke durch verstärkendes Lernen zu übertreffen.

Da spezialisierte KI-Systeme immer schneller und leichter verfügbar werden, wird es für Ingenieure immer reizvoller, Probleme als Spiel zu formulieren. »Ich denke, dass das Selbstspiel und ähnliche Systeme in Zukunft immer wichtiger werden«, sagt Sutskever.

Maschinen mit menschlichen Fertigkeiten sind jedoch bisher nicht in Sicht. Selbst ein autodidaktischer Brettspielmeister wie AlphaZero hat in dieser Hinsicht noch einen weiten Weg vor sich. »Es gibt eine wirklich große Kluft zwischen dem wirklichen Denken, der kreativen Erforschung von Ideen und dem, was wir derzeit unter künstlicher Intelligenz verstehen«, sagt Josh Tenenbaum, ein Kognitionswissenschaftler am Massachusetts Institute of Technology. »Diese Art von Intelligenz gibt es zwar, aber sie existiert vor allem in den Köpfen großer KI-Forscher.« ◀

QUELLEN

Mnih, V. et al.: Playing Atari with Deep Reinforcement Learning. In: ArXiv, 1312.5602, 2013

Silver, D. et al.: Mastering the Game of Go without Human Knowledge. In: Nature 550, S. 354–359, 2017

Übersetzte, redigierte und aktualisierte Fassung des Artikels »Why Self Taught Artificial Intelligence has Trouble with the Real World« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus der Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

 **Quanta**magazine

INTERVIEW

DIE ZUKUNFT DER KI

Judea Pearl ist ein Pionier im Bereich der künstlichen Intelligenz. Der Informatiker glaubt, dass sein viel beachtetes Forschungsgebiet in Wirklichkeit in der Klemme steckt: Es habe sich seit Jahrzehnten kaum weiterentwickelt. Der Ausweg besteht ihm zufolge darin, den Systemen beizubringen, nach dem Warum zu fragen.



Kevin Hartnett ist Wissenschaftsjournalist. Er lebt in Columbia (South Carolina).

» spektrum.de/artikel/1594012

Heutige Maschinen verdanken viele ihrer Fähigkeiten dem berühmten Informatiker Judea Pearl. Durch seine Arbeiten aus den 1980er Jahren können sie dank so genannter bayesscher Netze probabilistische Schlüsse ziehen, etwa um Diagnosen zu stellen: Kehrt beispielsweise eine Person mit Fieber und Kopfschmerzen aus Afrika zurück, erkennt ein Computer Malaria als wahrscheinlichste Ursache dafür. Es waren hauptsächlich diese Arbeiten, für die Pearl 2011 den Turing Award erhielt, eine der höchsten Auszeichnungen in der Informatik.

MONICA ALMEIDA/UTS/ANALMED/PHOTO.COM/ EBR QUANTA MAGAZINE

In seinem neuesten Buch, »The Book of Why«, prangert Judea Pearl die weltweite KI-Zunft an. Seit Jahren habe sich die Forschung kaum weiterentwickelt, so der Informatiker.



Inzwischen preisen immer mehr Schlagzeilen die neuesten Durchbrüche in maschinellem Lernen und den neuronalen Netzen. Wir lesen von Computern, die Brettspiele meistern und Autos fahren. Doch Pearl ist mittlerweile einer der schärfsten Kritiker seines eigenen Forschungsgebiets. In seinem neuesten Buch, »The Book of Why: The New Science of Cause and Effect«, bemängelt er, dass sich das Gebiet der künstlichen Intelligenz in den letzten drei Jahrzehnten kaum weiterentwickelt hat. Seiner Ansicht nach ist die aktuelle Technik nur eine aufgemotzte Version der Maschinen, die es schon damals gab.

Herr Pearl, warum heißt Ihr neues Buch »The Book of Why«?

Es soll meine Arbeit der letzten 25 Jahre zusammenfassen: was Ursache und Wirkung im eigenen Leben bedeuten, welche Anwendungen sie haben und wie wir Antworten auf Fragen finden, die von Natur aus kausal sind. Seltsamerweise hat die Wissenschaft aufgehört, sich damit zu beschäftigen. Ich versuche diese Vernachlässigung auszugleichen.

Dass die Wissenschaft die Erforschung von Ursache und Wirkung aufgegeben habe, ist eine äußerst provokante Aussage. Ist es nicht genau das, worum es in der Wissenschaft eigentlich geht?

Natürlich, man kann es jedoch nicht immer in Gleichungen ausdrücken. Die Sprache der Algebra ist symmetrisch: Wenn X etwas über Y aussagt, dann erzählt Y auch etwas über X. Ich spreche aber von deterministischen Beziehungen. In der Mathematik gibt es keine Möglichkeit, solche einfachen Tatsachen zu beschreiben – zum Beispiel, dass der aufkommende Sturm die Anzeige des Barometers senkt und nicht umgekehrt.

Glücklicherweise bietet die Wissenschaft einen Ausweg: Wenn ein Rechenprinzip für asymmetrische Beziehungen fehlt, ermutigt sie uns, eines zu schaffen. Ich habe mich überaus darüber gefreut, dass man mit einfacher kausaler Analysis Probleme lösen kann, welche die größten Statistiker unserer Zeit als unlösbar ansahen. Und das gelang mir mit elementarer Schulgeometrie.

Vor drei Jahrzehnten haben Sie Maschinen beigebracht, probabilistische Schlüsse zu ziehen. Was war der damalige Stand der Forschung?

Unsere Probleme in den frühen 1980er Jahren waren prädiktiver oder diagnostischer Natur. Ein Arzt betrachtet die Symptome eines Patienten und möchte wissen, wie wahrscheinlich es ist, dass die Person an dieser oder jener Krankheit leidet. Wir wollten automatisierte Systeme entwickeln, die einen bezahlten Experten ersetzen können – sei es ein Arzt oder ein Mineralienforscher. Ich entschied damals, es mit Stochastik zu versuchen.

Allerdings wuchsen schon für gewöhnliche Wahrscheinlichkeitsberechnungen der dafür benötigte Speicherplatz und die Rechenzeit exponentiell mit der Größe der Aufgabe an. Deshalb entwickelte ich die bayesschen Netze, die lediglich polynomiell mit dem Problem anwachsen und zudem leicht nachvollziehbar sind.



MONICA ALMEIDA / HTTPS://WWW.MALMEDPHOTO.COM/ FOR QUANTA MAGAZINE

Judea Pearl

ist ein israelisch-US-amerikanischer Professor für Computerwissenschaften an der University of California in Los Angeles. 2011 erhielt er für seine Arbeiten zu bayesschen Netzen und dem stochastischen Zugang zur künstlichen Intelligenz den Turing Award. Inzwischen ist er zu einem der größten Kritiker des eigenen Fachgebiets geworden.

In Ihrem neuen Buch bezeichnen Sie sich als Abtrünnigen der KI-Gemeinschaft. Inwiefern sind Sie abtrünnig?

Sobald wir die Programme entwickelt hatten, die probabilistisch mit einer gewissen Unsicherheit Schlüsse ziehen können, habe ich dieser Forschung den Rücken gekehrt und mich einer anspruchsvolleren Aufgabe gewidmet: der kausalen Schlussfolgerung. Viele meiner Kollegen beschäftigen sich immer noch mit der probabilistischen Unsicherheit, ohne sich um die kausalen Aspekte eines Problems zu kümmern. Alles, was sie wollen, sind gute Vorhersagen. Die Arbeiten zu maschinellem Lernen, die wir heute sehen, sind bloß diagnostischer Natur – zum Beispiel, wenn Computer Katzen in Bildern identifizieren. Sie können Objekte erkennen und sagen voraus, wie sich ein System zeitlich entwickeln wird, jedoch ohne es zu beeinflussen.

Als ich die bayesschen Netze entwickelte, wusste ich bereits, dass probabilistisches Folgern nur die Spitze der menschlichen Intelligenz ausmacht. Wenn Computer auch über Interventionen (»Was, wenn wir Zigaretten verbieten?«) und Introspektionen (»Was, wenn ich die Schule

beendet hätte?) nachdenken sollen, müssen wir uns auf kausale Modelle berufen. Probabilistische Schlussfolgerungen reichen dafür nicht aus – und das ist keine Meinung, sondern eine mathematische Tatsache.

Die Menschen sind begeistert von all den Einsatzgebieten künstlicher Intelligenz. Wie steht es mit Ihnen?

Wenn ich mir anschau, was Forscher in diesem Bereich machen, sehe ich, dass sie alle auf der Ebene der Assoziationen stehen geblieben sind. Jede beeindruckende Errungenschaft des »deep learning« läuft darauf hinaus, eine Kurve an Daten anzupassen. Aus mathematischer Sicht ist es egal, wie geschickt man das tut – es bleibt eine Kurvenanpassung, wenn auch komplex und keinesfalls trivial.

Das klingt, als seien Sie vom maschinellen Lernen nicht besonders beeindruckt.

Nein, im Gegenteil, ich bin sehr beeindruckt. Wir hatten nicht erwartet, dass sich so viele Probleme durch reine Kurvenanpassung lösen lassen. Aber ich frage mich, was die Zukunft bringt. Wird ein Roboter künftig ein Experiment planen und neue Antworten auf anstehende wissenschaftliche Fragen finden können?

Außerdem möchten wir auf sinnvolle und intuitive Weise mit Maschinen kommunizieren. Doch das ist unmöglich, wenn man ihnen die menschliche Intuition zu Ursache und Wirkung vorenthält. Roboter könnten dann nicht sagen: »Ich hätte es besser machen sollen«, wie wir Menschen es tun. Damit verlieren wir einen wichtigen Kommunikationskanal.

Wie stehen die Chancen, dass es bald Maschinen gibt, die unsere Einstellung zu Ursache und Wirkung teilen?

Zunächst müssen wir die Programme mit einem realistischen Modell unserer Welt ausstatten. Ohne ein solches Modell kann sich eine Maschine nicht intelligent verhalten. In den nächsten zehn Jahren werden Informatiker vermutlich die ersten realistischen Konzepte programmieren.

Der nächste Schritt wäre, dass Maschinen diese Modelle selbst entwickeln, durch empirische Erkenntnisse verifizieren und verfeinern. So etwas hat sich in der Wissenschaft auch schon früher zugetragen: Wir haben mit einem geozentrischen Weltbild begonnen und sind schließlich zu einem heliozentrischen übergegangen.

Wie reagieren andere Wissenschaftler auf Ihre Ideen?

Die Forschungsgemeinschaft der künstlichen Intelligenz ist derzeit geteilt. Auf der einen Seite gibt es diejenigen, die vom Erfolg des maschinellen Lernens und der neuronalen Netze berauscht sind. Sie verstehen nicht, wovon ich rede. Sie wollen weiterhin nur Kurven anpassen. Wenn ich aber mit Leuten spreche, die auch in Bereichen außerhalb des statistischen Lernens gearbeitet haben, verstehen sie mich sofort. Inzwischen sind immer wieder Arbeiten über die Grenzen maschinellen Lernens erschienen. Dahinter steckt ein großes Bemühen, zu verstehen, wohin wir nun gehen sollen und was der nächste Schritt ist.

»Jede beeindruckende Errungenschaft des »deep learning« läuft darauf hinaus, eine Kurve an Daten anzupassen«

Denken Sie, dass es in Zukunft Roboter mit einem freien Willen geben wird?

Auf jeden Fall. Wir müssen verstehen, wie man sie programmiert und was wir davon haben könnten. Das Gefühl eines freien Willens scheint ja evolutionär wünschenswert zu sein.

Inwiefern?

Menschen haben das Gefühl eines freien Willens; die Evolution hat uns damit ausgestattet. Offensichtlich erfüllt es einen gewissen Zweck, der sich rechnet.

Woran werden wir merken, dass Roboter einen freien Willen haben?

Sobald sie anfangen, kontraproduktiv miteinander zu kommunizieren, etwa durch Aussagen wie »Du hättest es besser machen sollen«. Wenn eine Fußballmannschaft aus Robotern beginnt, so zu kommunizieren, dann haben sie ein Gefühl des freien Willens. »Du hättest es tun sollen« bedeutet, dass das Gegenüber frei entscheiden konnte. Die ersten Anzeichen werden also in der Kommunikation zu finden sein, die nächsten in besserem Fußball.

Wenn man frei ist, eigene Entscheidungen zu treffen, kann man auch böse sein. Was heißt das in diesem Fall für Sie?

Das Böse stammt von dem Glauben, dass unser Groll wichtiger ist als alle gesellschaftlichen Normen. Jede Person hat beispielsweise eine Seite, die ihr sagt: »Du bist hungrig, also darfst du handeln, um deine Gier zu befriedigen.« Andererseits versuchen wir, die gesellschaftlichen Normen zu befolgen. Wenn man seine Unzufriedenheit über diese Normen stellt, ist das böse.

Woher werden wir also wissen, ob eine Maschine in der Lage ist, böse zu sein?

Wenn wir bemerken, dass ein Roboter einige Softwarekomponenten konsequent ignoriert, während er andere befolgt. Dann ist auch ein Roboter zu Bösem fähig. ◀

Übersetzte, redigierte und aktualisierte Fassung des Artikels »To Build Truly Intelligent Machines, Teach them Cause and Effect« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus der Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

SCHLICHTING! SCHMELZENDE EISBERGE



Schwimmendes Eis taucht in Salzwasser weniger tief ein als in Süßwasser. Das gilt auch für Eisberge, weshalb sie mehr Flüssigkeit enthalten, als sie verdrängen. Dadurch hebt sich bei ihrem Abschmelzen der Meeresspiegel ein wenig.

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/1594016

Die Würde, die in der Bewegung eines Eisbergs liegt, beruht darauf, dass nur ein Achtel von ihm über dem Wasser ist

Ernest Hemingway (1899–1961)

► In Zeiten der Klimaerwärmung ist oft davon die Rede, wie sich das global schwindende Eis auf die Pegelstände der Weltmeere auswirkt. Dabei geht es meist nur um Schmelzwasser oder Eis, das vom Festland in die Ozeane gelangt. Implizit oder sogar explizit unterstellen viele, das bereits auf dem Wasser driftende Eis erhöhe durch sein Auftauen den Meeresspiegel nicht weiter. Typischerweise lautet das Argument, ein Eisberg enthalte schließlich immer gerade so viel gefrorenes Wasser, wie er flüssiges verdränge – quasi ein Nullsummenspiel.

Zur Veranschaulichung dient dann häufig ein einfaches Freihandexperiment: Man setze einen Eiswürfel in ein randvoll mit Wasser gefülltes Glas. An dieser Füllhöhe ändert sich nichts, während der Eiswürfel auftaut und schließlich ganz zerlaufen ist. Man könnte sogar fragen, ob der Versuch überhaupt durchgeführt werden muss. Ergibt sich der Ausgang nicht bereits aus den bekannten Eigenschaften des Wassers beim Übergang zwischen den Aggregatzuständen?

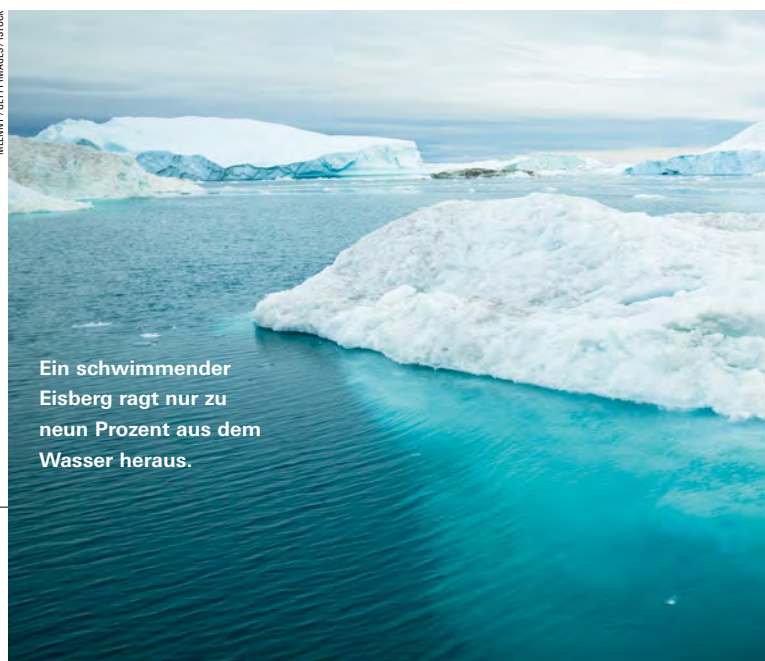
Eis schwimmt überhaupt nur, weil Wasser im Unterschied zu den meisten anderen Stoffen beim Abkühlen nicht einfach immer dichter wird, sondern sich unterhalb einer Temperatur von vier Grad Celsius wieder ausdehnt. Zwischen den Molekülen bilden sich dann über so genannte Wasserstoffbrücken zunehmend Strukturen, die vergleichsweise viel Platz einnehmen. In der Flüssigkeit passiert das bereits zum Teil, und im Kristall ist diese raumgreifende Ordnung perfekt. Während ein Kubikzentimeter flüssiges Wasser bei null Grad eine Masse von rund 1 Gramm besitzt, sind es beim gleichen Volumen

Eis nur etwa 0,92 Gramm. Daher sinkt der Eiswürfel auch nicht ganz ins Wasser ein, sondern ein Teil von etwa neun Prozent seines Volumens ragt heraus. Demgegenüber geht beispielsweise ein Klumpen festen Kerzenwachses in flüssigem Wachs unter.

Um das auch quantitativ zu verstehen, hilft das so genannte archimedische Prinzip: Auf einen eintauchenden Gegenstand wirkt eine Auftriebskraft, die dem Betrag nach der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit entspricht. Für die weitere Argumentation kann man mit der Masse der beteiligten Objekte rechnen, da die Kräfte gleich dem Produkt aus der Masse und der konstanten Erdbeschleunigung sind.

Wenn wir einen Eiswürfel von zehn Gramm und damit einem Volumen von etwa 10 Gramm / 0,92 Gramm pro Kubikzentimeter = 10,9 Kubikzentimeter ins Wasserglas setzen, verdrängt er nach dem archimedischen Prinzip genau zehn Gramm Wasser. Sobald er schmilzt, nimmt seine Dichte zu und sein Volumen ab, bis dieses ebenso groß ist wie das des ursprünglich verdrängten Wassers. Das Niveau wird sich also nicht ändern.

MILNIN / GETTY IMAGES / ISTOCK



Ein schwimmender Eisberg ragt nur zu neun Prozent aus dem Wasser heraus.



Oben: Wenn flüssiges Kerzenwachs (links) und Wasser (rechts) in einem randvoll gefüllten Schraubverschluss erstarren, nimmt das Volumen des Wachses wie bei den meisten Stoffen ab. Beim Wasser ist es gerade umgekehrt. Rechts: Ein Süßwassereiswürfel driftet in Salzwasser (links). Nachdem er geschmolzen ist, hat sich der Wasserspiegel etwas gehoben (rechts).

Doch die Situation von Eisbergen im Meer ist eine andere – schließlich schwimmen sie in Salzwasser. Um das Experiment entsprechend zu modifizieren, müssen wir nunmehr solches anstatt Süßwasser ins Glas füllen. Ein Eiswürfel von zehn Gramm wird abermals eine Masse von zehn Gramm Salzwasser verdrängen. Aber wegen dessen größerer Dichte (beim Oberflächenwasser der Meere sind es im Durchschnitt 1,026 Gramm pro Kubikzentimeter) ist das verdrängte Volumen geringer, nämlich etwa 9,7 Kubikzentimeter. Der Würfel ragt also ein wenig weiter heraus. Wenn er schmilzt, fügt er der Flüssigkeit trotzdem seine ganzen zehn Kubikzentimeter Wasser hinzu, weshalb das Volumen um knapp 2,6 Prozent wächst und der Spiegel entsprechend ansteigt.

Ein Stück Arktis im Wasserglas

Der Effekt ist umso ausgeprägter, je mehr Salz anfangs im Wasser gelöst war. Hausmittel verschaffen leicht einen experimentellen Eindruck davon: Bei einem Versuch befand sich ein Eisblock von 90 Gramm in einem zylindrischen Glas mit einem Durchmesser von 5,7 Zentimetern (siehe Fotos oben rechts) in Salzwasser mit einer Dichte von 1,2 Gramm pro Kubikzentimeter (100 Gramm Salz vollständig in 500 Gramm Wasser aufgelöst). Nachdem das Eis geschmolzen war, betrug der Höhenunter-



schied 1,3 Millimeter (da das Wasser das Glas benetzt, entsteht ein Meniskus; die Messung orientiert sich an dessen unterem Rand). Ein solcher Anstieg war – im Rahmen der Messgenauigkeit – rein rechnerisch zu erwarten. Der Effekt ist sehr klein, trotz der wesentlich größeren Salzkonzentration als im Meerwasser.

Doch lässt sich das überhaupt auf einen Anstieg des Meeresspiegels durch schmelzende Eisberge übertragen? Schließlich sind wir in unseren Überlegungen und beim Experiment stets von Süßwassereis in Salzwasser ausgegangen. Tatsächlich bestehen auch Eisberge weitgehend aus Süßwasser. Das Meersalz wird beim Gefrieren nicht in das Kristallgitter eingebaut, sondern überwiegend an die Ozeanumgebung abgegeben. Nur zu einem kleinen Teil sammelt es sich in Soletaschen und erhöht damit ein wenig die Dichte des Eisbergs. Das führt aber lediglich zu unwesentlichen Korrekturen.

Sollte alles driftende Eis zerrinnen, hätte das also zumindest theoretisch gewisse Auswirkungen. Grobe Abschätzungen für das global von schwimmendem Eis verdrängte Wasservolumen in der Fachliteratur liefern einen Wert von 660 000 Kubikkilometern, während das Meerwasser auf einer Gesamtfläche von etwa $3,6 \cdot 10^8$ Quadratkilometern verteilt ist. Wenn man Änderungen des Küstenverlaufs ignoriert, ergibt das zusammen mit dem Wert für die Volumenzunahme einen Anstieg von vier Zentimetern. Dieser Betrag mag angesichts der in den Klimaszenarien diskutierten sonstigen Pegeländerungen gering erscheinen – vernachlässigbar ist er jedoch nicht.

QUELLE

Noerdlinger, P. D., Brower, K. R.: The Melting of Floating Ice Raises the Ocean Level. In: *Geophysical Journal International* 170, S. 145–150, 2007



KIRCHENMUMIEN UNVERSEHRT BIS ZUM JÜNGSTEN GERICHT

Versprach eine Gruft den körperlichen Zerfall zu verhindern, ließen sich Adlige und geistliche Würdenträger gern darin zur letzten Ruhe betten. War dies eine Demonstration ihres gesellschaftlichen Rangs?



AUF EINEN BLICK GUTE LUFT IM GRAB

- 1** Obwohl ein intakter Körper nach dem Tod für Christen keine Bedeutung hat, bergen europäische Kirchengrüfte und Katakomben vermutlich rund 1000 Mumien aus dem 16. bis 20. Jahrhundert.
- 2** Diese entstanden meist auf natürlichem Weg, insbesondere durch Austrocknen in gut belüfteten Anlagen sowie durch Flüssigkeit absorbierende Materialien im Sarg.
- 3** Mitunter wurden solche Grüfte wohl gezielt ausgesucht, etwa zur Vermeidung von Verwesungsgeruch, aber auch als Mittel wider das Vergessen.

Kühle und gute Belüftung: In dieser Gruft unter der Klosterkirche von Riesa blieben Leichname über Jahrhunderte erhalten.



Die Archäologin und Anthropologin **Amelie Alterauge** vom Institut für Rechtsmedizin der Universität Bern promoviert zum Thema des Beitrags am Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Heidelberg.

» spektrum.de/artikel/1586266

*»In dunkler Gruft
Das Gebein;
In Licht und Luft
Der aufgerichtete Marmelstein.*

*Was ungemessen
Vielleicht gestrebt,
Es ist vergessen –
Nur das Bild noch lebt.«*

Als Theodor Fontane die Kirche von Groß-Glienicke besuchte, »auf halbem Wege zwischen Potsdam und Spandau«, entdeckte er nicht nur die Gedenksteine des Ritters Hans Georg von Ribbeck und seines gleichnamigen Sohns, sondern zudem ihre Leichen. »Beide finden wir auch in der Gruft der Kirche wieder. Wie sie im Schiff, in bildlicher Darstellung, nebeneinanderstehen, so liegen sie hier nebeneinander. Wohlerhalten. Denn die Groß-Glienicker Gruft gehört zu den vielen in der Mark, in denen die beigesetzten Leichen zu Mumien werden«, notierte der Autor in seinen 1880 erschienenen »Wanderungen durch die Mark Brandenburg«. Und verfasste, von diesem Erlebnis beeindruckt, das oben zitierte Gedicht.

Das erstaunliche Phänomen war keineswegs auf diese Region begrenzt. Vielmehr gab es seit dem 16. bis ins frühe 20. Jahrhundert eine regelrechte europäische Mumientradition. Zu Fontanes Zeit galt dergleichen allerdings oft als Kuriosität und fand eher Eingang in Gruselgeschichten und Heimatlegenden als in wissenschaftliche Abhandlungen. Beispielsweise erklärte man sich den seit seinem Tod 1702 kaum verwesenen Ritter Christian Friedrich von Kahlbutz in der Dorfkirche von Kampehl (Brandenburg) mit einem Mord und einem Meineid. Er habe den Verlobten seiner Dienstmagd umgebracht, weil die ihm das Recht der ersten Nacht verweigert hatte. Vor Gericht leugnete er der Sage nach und schwor: »Wenn ich doch der Mörder bin gewesen, dann wolle Gott, soll mein Leichnam nie verwesen.« Fortan bereitete der Leichnam anderen Sündern Verderben. Als napoleonische Soldaten ihn 1806 zum Spaß ans Kreuz der Kirche nageln wollten, sprang seine Hand wieder zurück und ohrfeigte dabei einen der Frevler, worauf der Mann vor Schreck starb.

Einen wahren Kern hat letztere Anekdote in jedem Fall: Vandalismus. Viele Gräfte wurden im Lauf der Zeit geplündert, für Mutproben oder makabre Feiern missbraucht. Mitunter hat man sie auch im Zuge von Kirchenrenovierungen ausgeräumt, ohne das Gesehene zu dokumentieren, und die menschlichen Überreste auf dem Friedhof wieder bestattet. Heutzutage gelten solche neuzeitlichen Grabstätten als Teil unseres europäischen kulturellen Erbes und werden seit etwa 30 Jahren wissenschaftlich untersucht. So setzt sich die »Forschungsstelle Gruft« in Lübeck seit 2011 dafür ein, die historischen Särge in Zusammenarbeit mit Restauratoren zu erhalten und die Würde der Begräbnisstätten wiederherzustellen.

Kirchengräfte dienen zunächst einem einzigen Zweck: das im Leben Erreichte nach dem Tod zu bezeugen und sich als bedeutende Person des gesellschaftlichen Lebens in Erinnerung zu halten. Den Anfang machten der Hoch-

SERIE Mumien

Teil 1: September 2018
Dino, Mammut & Co.
Wilfried Rosendahl und Doris Döppes

Teil 2: Oktober 2018
Fürsorge bis ins Jenseits
Stephanie Zesch

Opfer für die Andengötter
Stephanie Zesch

Teil 3: November 2018
Unversehrt bis zum Jüngsten Gericht
Amelie Alterauge

adel und geistliche Würdenträger (siehe **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 3/2018, S. 70), ihrem Beispiel folgten der niedere Adel und das Großbürgertum. Die neuzeitlichen Anlagen ersetzten die für eine Person gedachten Kirchengrüfte des Mittelalters und boten gleich Platz für Familien oder religiöse Gemeinschaften. So geborgen erwartete der Verstorbene den Jüngsten Tag und die erhoffte Auferstehung.

Man baute meist Gewölbe aus einer oder mehreren Kammern in oder an der Kirche, bevorzugt unter dem Hochaltar. Auch das bekundete den Rang der Beigesetzten, platzierte es sie doch in die Nähe des Abendmahls und damit in die Nähe des dabei anwesenden Jesus Christus. Die Toten wurden zunächst in einem inneren, fast immer hölzernen Sarg auf ein Tuch und Kissen gebettet, den man dann mitunter noch in einen äußeren aus Holz, Metall oder Stein hob. Dieser konnte mit Bibelziten, Inschriften zur Vita des Verstorbenen oder religiösen Motiven verziert sein (siehe Bild). In späteren Jahrhunderten fehlte solcher Schmuck, aber das Behältnis besaß zur Abgrenzung von einer einfachen Kiste eine geschwungene Form. Die gesamte Gestaltung war auf den Toten ausgerichtet, angefangen bei der Größe bis hin zu eventuellen Inschriften. So steht beispielsweise auf Kindersärgen in der Klosterkirche des sächsischen Riesa zu lesen: »Heute rot, morgen tot.« Gemeint waren die rosige Gesichtsfarbe von Kindern sowie deren plötzlicher Tod.

Finger, Zehen, Nase und Ohren trocknen zuerst

Anders als ein Erdgrab waren solche Gruftanlagen oft trocken, vor allem wenn sie über dem Grundwasserspiegel lagen. Dicke Kirchenmauern schirmten zudem die Witterung der Außenwelt ab, so dass weitgehend konstante Temperaturen herrschten. Häufig sorgten die Erbauer mit einander gegenüberliegenden Öffnungen für einen ständigen Luftzug, damit Verwesungsgeruch abzog. Dadurch verlor der Leichnam zudem Wasser, und wenn dies schneller geschah, als Fäulnis und Verwesung voranschritten, mumifizierte er auf natürliche Weise. Finger und Zehen, Nase und Ohren trockneten zuerst, während sich die inneren Organe häufig noch so weit zersetzten, dass eine amorphe Masse zurückblieb. Am Ende wurde die Haut ledrig und sank ein, die Extremitäten erstarrten in der Position, in der man die Leiche beigesetzt hatte. Die getrocknete Mumie eines Erwachsenen wog dann nur noch sieben bis zehn Kilogramm.

Zur Mumifizierung trug auch die Auspolsterung des Sargs mit Hobelspänen, Reisig, Stroh, Heu oder Hopfen bei. Denn nach heutiger Kenntnis wurde ein Vornehmer nach seinem Tod noch drei bis vier Tage aufgebahrt, mitunter länger, etwa wenn die Verwandtschaft von weit weg anreiste oder der Tote überführt werden musste. Der Zerfall hatte dann zum Zeitpunkt der Beisetzung in der Gruft bereits eingesetzt. Vor allem Hobelspäne nahmen die aus einer Leiche austretenden Flüssigkeiten gut auf und hielten sie trocken. Der wegen seines aromatischen, den Verwesungsgestank überdeckenden Geruchs zugegebene Hopfen wirkte antibakteriell und antimykotisch, behinderte also weiteren Zerfall. Da er als schlaffördernde Heilpflanze galt,

kam ihm wohl zudem eine symbolische Bedeutung zu. Auch andere Pflanzenbeigaben hatten Symbolcharakter – etwa die immergrünen Zweige von Buchsbaum oder Tanne als Zeichen für ewiges Leben und Auferstehung – oder sollten Fäulnisgeruch überdecken. Schließlich sollte nichts die Kirchenbesucher vom Gottesdienst ablenken.

Die auf gut 1000 geschätzte Zahl der Gruftmumien lässt vermuten, dass sie keine zufällige Begleiterscheinung eines neuzeitlichen Bestattungsrituals waren. Vielleicht ging es zunächst vor allem darum, Verwesungsgerüche zu vermeiden, zumal diese als krank machend galten (siehe **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 2/2018, S. 78). Später aber brachte man Leichname wohl gezielt an Orte, von denen man wusste, dass dort generell kaum Verwesung stattfand. Allerdings gibt es nur wenige Belege solcher Absicht wie etwa im Fall des Curt Robert Freiherr von Welck (1798–1866). Er hatte an der Nordseite der Klosterkirche von Riesa eine ebenerdige Gruft für sich und seine Familie anlegen lassen, nachdem er 1828 dort Mumien in Augenschein genommen hatte. Die lagen zwar unter dem Altar, dennoch erfüllte sich die Hoffnung, und die Beigesetzten seiner Familie mumifizierten.

Im Gegensatz zum alten Ägypten glaubte man freilich nicht daran, dass ein intakter Körper die Voraussetzung für ein gutes jenseitiges Leben darstellte. Vielleicht betrachteten Christen der Frühen Neuzeit die Mumifizierung aber als zusätzliche Absicherung: Ein unversehrter Leib war für die Auferstehung am Jüngsten Tag nicht notwendig, konnte aber auch nicht schaden.

Hier zu Lande war dieser Brauch – an den noch erhaltenen Grüften gemessen – vor allem in protestantischen Gebieten Nord- und Ostdeutschlands wie Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt verbreitet. Allerdings mag die spätere politische Entwicklung diese Statistik verfälscht haben: In der DDR

wurden Kirchen vernachlässigt, während man in der Bundesrepublik im Zuge des Wiederaufbaus Got-



Das Foto zeigt den Sarg einer tot geborenen Tochter von Hans Christoph von Felgenhauer auf Hirschstein, gestorben am 20. März 1685, aus der Gruft unter dem Altar der Klosterkirche von Riesa. Das Äußere ziert die Bibelstelle: »Der Mensch vom Weibe geboren lebet eine kurze Zeit. Es ist nicht der Wille euers Vaters im Himel daß eines von den Kleinsten verlohren werde.«



STEFFEN GERSCHL, DRESDEN

Mit einem mobilen Röntgengerät untersucht die Autorin eine Mumie in der Kirchengruft von Riesa.

teshäuser renovierte und umbaute. Zudem wurden im Zuge der Französischen Revolution viele Adelsbestattungen in Frankreich und Westdeutschland geplündert oder ausgeräumt. Natürliche Mumifizierungen gab es ebenfalls in Dänemark, Frankreich, Italien, Polen, Österreich, Schweden, Tschechien und Ungarn, wobei die religiöse Zugehörigkeit überregional betrachtet keine Rolle spielte.

Besonders berühmt für seine Gruftanlagen war der Orden der Kapuziner. Die natürliche Mumifizierung in den Katakomben von Rom und Palermo weckte auch bei frommen Laien den Wunsch, dort beigesetzt zu werden. Um diese Nachfrage zu decken, brachten die Mönche Leichname zunächst in Bereiche, in denen Kadaver erfahrungsgemäß besonders schnell trockneten, und betteten sie zudem auf Terrakottaröhren, die über Steinwannen lagen; Leichenflüssigkeit konnte so schnell abfließen. Zur endgültigen Konservierung wurden die Körper noch mit Essig, Kreide und Arsen behandelt, bevor man sie entlang der Korridore aufstellte.

Der Normalfall, wenn man bei dieser für Europa ungewöhnlichen Beisetzungsform von Normalität sprechen kann, war jedoch die private Kirchengruft für eine Familie. Nicht immer verzeichnet ein Sarg den Namen und die Lebensdaten des Verstorbenen, mitunter befinden sich Mumien nicht mehr in ihrer ursprünglichen Totenkiste. Aus Kirchenbüchern, insbesondere den Sterberegistern eines Gotteshauses, lässt sich eine Liste der in einer Gruft Beigesetzten erstellen und mit dem Stammbaum der jeweiligen Familie abgleichen. Das Ergebnis ist nicht immer eindeutig, denn manchmal wurden auch die Schwiegereltern und entfernte Verwandte in der Anlage bestattet, sogar Freunde, die während eines Besuchs verstarben. Auf der anderen Seite fehlen manche Mitglieder: etwa ältere Söhne, die in den Krieg zogen und fern der Heimat beerdigt wurden, oder verheiratete Töchter, die in der Familiengruft des Ehemannes ihre letzte Ruhestätte fanden.

Sargform und -beschläge sowie Kleidung und Schuhe folgten Moden, erlauben es also, eine Bestattung zeitlich einzuordnen. Weitere Anhaltspunkte für die Identifizierung einer Mumie liefern Anthropologen und Pathologen. Mit Mikroskopen und Computertomografen erkennen sie zum Beispiel Geschlecht, Sterbealter oder Krankheiten. Trägt man alles zusammen, ergibt sich mitunter Überraschendes. In der Gruft von Nedlitz bei Magdeburg etwa wurden sieben Personen bestattet, von denen eine gut erhaltene Mumie auf Grund eines Mantelkleides als die 1753 verstorbene Johanna Juliane Pforte galt. Ein Computertomogramm zeigte aber das Skelett eines Mannes. Daraufhin wurde Erbgut aus konserviertem Gewebe gewonnen, ein Gentest bestätigte das männliche Geschlecht. Das Kleid entpuppte sich als Hausmantel. Wahrscheinlich handelt es sich um den 1826 verstorbenen Theologiestudenten Johann Friedrich Kohnert, während Johanna Juliane Pforte inzwischen in einem anderen Sarg entdeckt wurde.

Längst sind große und kleine Gräfte eine Touristenattraktion. Wer in Rom oder Palermo weilt, lässt sich die Katakomben der Kapuziner nicht entgehen, in Wien ist es insbesondere die unterirdische Anlage der Michaelerkirche. In Bremen gruselte man sich vor den acht Mumien im so genannten Bleikeller des St.-Petri-Doms, im brandenburgischen Kampehl vor dem eingangs erwähnten Ritter von Kahlbutz. Mumien haftet gleichzeitig etwas Kurioses, Anrührendes und Unheimliches an. Der Gegensatz von Tod und scheinbarer Unvergänglichkeit fasziniert aber nicht nur – das Ensemble aus Mumie und Gruft ist ein Memento mori: »Bedenke, dass du sterblich bist!« ◀

QUELLEN

Neumann, W. (Red.): Geschichte und Tradition der Mumifizierung in Europa: Beiträge zu einer Tagung im Museum für Sepulkralkultur 2010. Kasseler Studien zur Sepulkralkultur 18. Arbeitsgemeinschaft Friedhof und Denkmal e. V., Kassel 2011

Preuß, D. et al. (Hg.): Gräfte retten! Ein Leitfaden zum pietätvollen Umgang mit historischen Gräften. Fachhochschulverlag, Frankfurt 2014

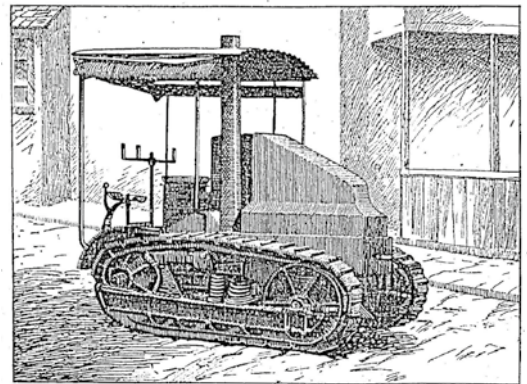
Schmitz-Esser, R.: Der Leichnam im Mittelalter. Einbalsamierung, Verbrennung und die kulturelle Konstruktion des toten Körpers. Mittelalter-Forschungen 48. Jan Thorbecke, Ostfildern 2014

1918

LANDLUFT STÄRKT STADTKINDER

»Schwächliche Grossstadtkinder [wurden] auf freien Rasenplätzen möglichst viel der Sonne und Luft ausgesetzt. Die gemischte Kost bestand aus Milch, Fleisch in kleinen Mengen und viel Obst und Gemüse. Die Anfälligkeit gegen Erkältungen und andere Krankheiten verschwanden, und im Blute vermehrten sich die roten Blutkörperchen. Die blassen, mageren Kinder wurden rundlich und muskelkräftig. Die Bedeutung der Sonne und der sonnendurchwärmten Luft wurde also auf das glänzendste bewiesen. Deshalb müssen mit allen Mitteln die Bestrebungen unterstützt werden, möglichst vielen Stadtkindern einen mehrwöchigen Aufenthalt auf dem Lande zu ermöglichen.« *Gesundheit 21/22, S. 334*

Zum Traktor umgebauter Panzer.



MIT DEM PANZER FELDER PFLÜGEN

»Es lag nahe, die in den letzten Kriegsjahren in so großer Zahl hergestellten Tanks zu friedlicher Arbeit zu benützen. Vorerst wird der Tank zum Treideln der Kanal- und Flußschiffe gebraucht. Diese Kähne [wurden] bisher von Pferden gezogen. Der Tank kann 4 Schiffe doppelt so schnell ziehen als die Pferde. In zweiter Linie sucht man die Tanks zu landwirtschaftlichen Zugmaschinen zu benutzen [und] hofft, diese besonders zum Ackerbau verwenden zu können.« *Technische Monatshefte 11, S. 328/329*

1968



Mund-zu-Mund-Fütterung der Haubennetzspinne.

HOCHGEWÜRGTES, RADIOACTIVES BABYSPINNEN-FUTTER

»Für die Haubennetzspinne war verbürgt, daß die Nachkommen durch Regurgitation, d.h. Heraufwürgen des Darminhaltes, gepflegt werden. In Untersuchungen [zum Fütterungsverhalten] bei Insekten hat sich die Verwendung von radioaktiven Isotopen bewährt. Der [Mutter-] Spinne [wird] eine mit ³²P markierte Fliege als Nahrung geboten. Nach dem Schlupf werden Mutter und Junge an den folgenden Tagen auf ihren Gehalt an ³²P gemessen. Schon am ersten Tag waren alle Jungspinnen radioaktiv, [so] daß eine Fütterung stattgefunden haben muß – obwohl die Tiere nicht direkt beobachtet worden waren. Bei dieser Methode ist also die zeitraubende Direktbeobachtung nicht mehr erforderlich.« *Die Umschau 23, S. 720/721*

RAUCHEN IN DER SCHWANGERSCHAFT

»An der Universitätsfrauenklinik Freiburg wurde das Entwicklungsstadium bei Neugeborenen von Nichtraucherinnen [und] von Müttern, die während der ganzen Schwangerschaft geraucht hatten, verglichen. Dabei fand man das mittlere Geburtsgewicht der Kinder von Raucherinnen um 482,5 g und die Körperlänge um 2 cm geringer. Dies ist eine Folge ungenügender Sauerstoffzufuhr durch das beim Rauchen inhalierte Kohlenmonoxid (CO). Das aufgenommene Nikotin schädigt die Kapillaren [und] wirkt auf das vegetative Nervensystem und den Uterusmuskel. Die Folge sind Komplikationen während der Schwangerschaft, die bei Raucherinnen dreimal so oft vorkommen wie bei [Nichtraucherinnen].« *Kosmos 11, S. 376/377*

DER KRISTALL DER WEISEN

»Die potentiell sehr große Speicherkapazität von Alkali-Haloid-Kristallen [könnte] eine der besten Lösungen für das Problem der »Informationsexplosion« darstellen. Kalmann und seine Mitarbeiter haben bereits erfolgreich 1000 Seiten von Tolstois Werk [»Krieg und Frieden«] in einem einzigen Kristall [aus Kaliumbromid] gespeichert. Die Technik ist eine Variation des Holographie-Verfahrens. Der Kristall fängt einen vom Bildmaterial kommenden [Laser-] Strahl auf, so daß [seine] Farbzentren dem Beugungsbild des aufzunehmenden Materials ausgesetzt sind. Die gespeicherten Bilder lassen sich mittels eines Laserstrahles reproduzieren.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 11, S. 479/480*

Unsere Neuerscheinungen!



Tutanchamun: Vaterschaftstest nach 3300 Jahren • Friedhöfe: Wenn Körper nicht zu Staub zerfallen • Inka: Opfer für die Götter der Anden • Chirurgie: Ärztliche Kunst in Ägypten • Germanien: Tod im Moor • € 8,90



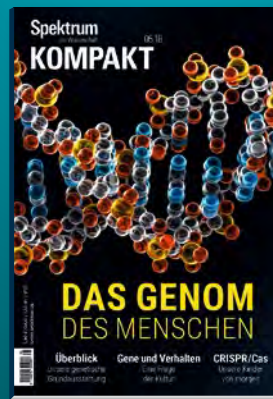
Geschlechterunterschiede: Was hat sie, was er nicht hat? • Genderforschung: Die Legende vom weiblichen Gehirn • Diversität: Der Vorteil sozialer Vielfalt • Stereotype: Die akademische Geniefalle • Kriminalistik: Mit Statistik gegen Mord und Totschlag • € 8,90



Dissoziation: Wenn sich das Ich fremd anfühlt • Stress: Die Folgen für Haut und Herz • Therapie: Mit Neurofeedback Schmerzen lindern • Ernährung: Wie der Darm die Psyche stärkt • Nachdruck; € 8,90



Von der Milchstraße zum Sternensystem • Zwerggalaxien: Trabanten der Milchstraße • Wie aus Gas und Staub Sterne entstehen • Offene Sternhaufen • Projekt Gaia: Die sechsdimensionale Milchstraße • € 9,90



Kreatives Erbgutchaos im Gehirn • Kaffeejunkie dank Genvariante? • CRISPR/Cas9: Unsere Kinder von morgen • Unsere genetische Grundausstattung • Genomsequenzierung: Am Ende einer diagnostischen Odyssee • € 5,90



Psychotherapie: Wege aus der Angst • REM-Schlaf: Ist Schlaflosigkeit nur geträumt? • Hypersexualität: Wann die Lust zur Last wird • Gesundheit: Wer Kaffee trinkt, stirbt später • Resilienz: Sich selbst ein guter Freund sein • € 5,90

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

**Alle
 Sonderhefte
 auch im
 PDF-Format**

REZENSIONEN



PHYSIK MEILENSTEINE DER NATUR- BEOBACHTUNG

Zwei Wissenschaftshistoriker stellen bedeutende Erkenntnisse der Physik vor.

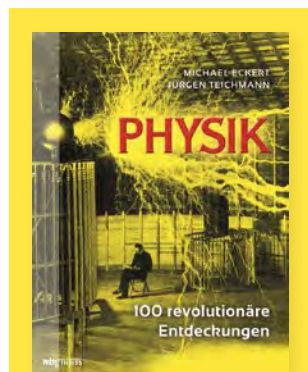
»Jedes Naturgesetz, das sich dem Beobachter offenbart, lässt auf ein höheres, noch unerkanntes schließen«, schrieb einst der Naturforscher Alexander von Humboldt. Seine prophetischen Worte kommen einem bei der Lektüre dieses Buchs immer wieder in den Sinn. Die Physiker Michael Eckert und Jürgen Teichmann behandeln darin gut verständlich die wichtigsten physikalischen Erkenntnisse von der griechischen Antike bis zur postulierten Dunklen Materie. Eckert ist Mitarbeiter des Forschungsinstituts des Deutschen Museums, Teichmann arbeitet als Professor für Wissenschaftsgeschichte an der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Insgesamt 100 Entdeckungen stellt das Autorenteam in kurzen Aufsätzen vor, die zusammen eine spannende Zeitreise durch die Physikgeschichte ergeben. Natürlich ist die Aus-

Der französische Aufklärer Bernard le Bovier de Fontenelle (1657–1757) postulierte, auch auf anderen Himmelskörpern als der Erde könne es Leben geben. Sein Werk »Unterhaltungen über die Vielheit der Welten« (1686, abgebildet ist der Frontispiz) hatte großen Erfolg.

wahl subjektiv; es gäbe sicher noch deutlich mehr zu berichten. Doch die Zusammenstellung bildet den allmählichen Wissenszuwachs gelungen ab und gibt die Entwicklung jener technischer Errungenschaften, die der Menschheit heute zur Verfügung stehen, angemessen wieder.

In dem Buch kommen nicht nur harte physikalische Fakten zum Tragen, die Autoren beschreiben auch die gesellschaftlichen und sozialen Umstände, die den Erkenntnisgewinn oft erst möglich machten. Zum Beispiel, wenn begeisterte



Michael Eckert,
Jürgen Teichmann

PHYSIK
100 revolutionäre Entdeckungen
Theiss, Darmstadt 2018
248 S., € 49,95

Adlige die begabtesten Forscher unterstützten und ihren Untertanen stolz die Ergebnisse präsentierten, wie bei der Entdeckung der Elektrizität. So erfreute sich die »Leidener Flasche«, eine frühe Bauform des elektrischen Kondensators, großer Beliebtheit bei Vorführungen an den europäischen Höfen. Eindrucksvoll zeigt das ein Gemälde aus dem Zarenpalast in Sankt Petersburg. Unbekümmert wurde dort 1777 die Wir-

kung der Elektrizität mit einer Reibungselektroskopmaschine und bloßen Händen vorgeführt, was bei den Teilnehmern zu dem einen oder anderen schmerzhaften Erlebnis geführt haben dürfte. Das Kunstwerk hängt heute im Archangelsk-Museum in Moskau.

Eckert und Teichmann haben viel Wert auf die Bebilderung ihrer Artikel gelegt. Jedes Kapitel ist eindrucksvoll illustriert. Die gelungene Optik hilft, physikalische Zusammenhänge, die vorgestellten Entdeckungen und ihren Kontext besser zu verstehen. Vor allem die zahlreichen historischen Abbildungen lassen das Buch zu einem Augenschmaus werden. Viele von ihnen dürften weitgehend unbekannt sein, da sie aus Büchern von Universitätsbibliotheken, Kunstsammlungen oder Museumsbeständen stammen. Allein sie zusammenzustellen, hat sicher jede Menge Zeit und Mühe gekostet.

Wie stark das Wissen aus früheren Zeiten dabei half, neue Erkenntnisse zu gewinnen, wird besonders in den Kapiteln über die Erkundung des Lichts deutlich. Immer wieder begegnen die Leser dem Thema Licht und Strahlung. In fast allen Epochen, von Euklid und Ptolemäus in der griechischen Antike über die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit im 17. und 18. Jahrhundert bis zur Erforschung der Dunklen Materie mit modernster Hochleistungselektronik, gewannen die Menschen neue Erkenntnisse über das so bedeutsame Phänomen. Und der Weg

ist noch lange nicht zu Ende, denn die Natur hat zahlreiche weitere Geheimnisse, nicht nur hinsichtlich der elektromagnetischen Strahlung. Es dürfte also nur eine Frage der Zeit sein, bis ein Nachfolger des Werks erscheint – jedenfalls wenn Alexander von Humboldt weiter so eindrucksvoll Recht behalten sollte.

Der Rezensent Thorsten Naerer ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.

GESCHICHTE 1200 JAHRE AUF 300 SEITEN

Die Geschichte Deutschlands war schon immer vom Föderalismus geprägt, zeigen ein Brite und ein Franzose auf.

Ist die Geschichte Deutschlands zugleich auch die der Deutschen? Viele würden wohl intuitiv mit Ja antworten. Doch genau betrachtet ist der Zusammenhang zwischen territorialer beziehungsweise politischer Existenz und nationaler Identität alles andere als klar. So wissen wir kaum etwas darüber, wie sich die »gewöhnlichen Menschen« im Mittelalter selbst sahen und womit sie sich identifizierten. Das Selbstverständnis politischer Eliten jedenfalls kann bis ins 19. Jahrhundert hinein nicht wirklich als deutsch bezeichnet werden. Die Kaiser beispielsweise nahmen sich lange Zeit eher als Erben Roms wahr; manch einer verbrachte während seiner Regentschaft überhaupt

keine Zeit auf deutschem Territorium. Die Fürsten wiederum hatten ihre jeweiligen regionalen Interessen; der Zusammenschluss unter einem gemeinsamen Herrscher bot ihnen in erster Linie politische und militärische Vorteile und war, wenn überhaupt, nur sehr nachrangig Ausdruck eines »Deutschseins«.

Erst als im 15. Jahrhundert die Macht des Hochadels verstärkt in Gefahr geriet – wegen Konflikten mit Franzosen, Türken und dem Heiligen Stuhl – entdeckten die Mächtigen »deutsch« als einigendes Attribut. Aus dem Heiligen Römischen Reich wurde nun das Heilige Römische Reich Deutscher Nation. Doch es sollten noch weitere Jahrhunderte vergehen, bis im 19. Jahrhundert, inspiriert von der Französischen Revolution, auch Intellektuelle (vor allem Studenten) begannen, sich eine nationale deutsche Identität zuzuweisen.

All das geht deutlich aus diesem Buch hervor, in dem der englische Historiker Joachim Whaley und der französische Geschichtswissenschaftler Johann Chapoutot die Herrschaftssysteme Deutschlands und deren Protagonisten skizzieren – vom frühen Mittelalter bis heute. Der Band ist in zwei etwa gleich starke Teile untergliedert: »800 bis 1806« von Whaley und »1806 bis heute« von Chapoutot. Eine originelle Idee: Die Teile folgen nicht linear aufeinander, sondern der zweite ist von hinten nach vorn und von oben nach unten gedreht. Indem man das Buch wendet, kann man ihn also beim hinteren

Deckel beginnend lesen. Das erleichtert das Hineinblättern.

Whaley beginnt seinen Abschnitt mit einem Ritt durch die mittelalterlichen Wahlmonarchien. Die damaligen Kaiser lagen in ständigem Machtkampf mit den selbstbewussten Kurfürsten und dem mächtigen Papst. Ihr Erfolg in diesem Gerangel bestimmte darüber, inwieweit sie als Führungspersonlichkeiten anerkannt wurden. Diese eigenartige Staatsform sorgte vor allem bei den französischen Nachbarn für einigen Spott. Allerdings sind hier wohl die Wurzeln des deutschen Föderalis-



Joachim Whaley und Johann Chapoutot

UNSERE GESCHICHTE
Deutschland 800 bis 1806
Theiss, Darmstadt 2018
304 S., € 24,95

mus zu suchen, wie er heute noch besteht, zeigt Whaley überzeugend auf. Vermutlich liegt hier sogar der Grund, warum alle Bestrebungen, Deutschland zentral zu regieren, bislang fürchterlich scheiterten und unter anderem in die beiden größten Katastrophen des 20. Jahrhunderts

Erst im Angesicht der Gefahr entdeckten die Mächtigen »deutsch« als einigendes Attribut

mündeten, den Ersten und Zweiten Weltkrieg.

Whaleys Abhandlung ist eine Übersetzung des Buchs »The Holy Roman Empire: A Very Short Introduction«, das in diesem Jahr bei Oxford University Press erscheint. Tatsächlich kann der Autor auf den zirka 150 Seiten nur eine sehr kurze Einführung in die 1000-jährige Geschichte des Heiligen Römischen Reichs geben. Nichtsdestoweniger bieten diese Seiten einen fundierten Rückblick auf die turbulente Entstehungsgeschichte des föderalen deutschen Staatswesens, das historisch eng mit dem Selbstbewusstsein der mittelalterlichen und frühneuzeitlichen Fürsten verbunden ist.

Auch Chapoutots Beitrag, der den zweiten Teil des Bands ausmacht, ist eine Übersetzung – in diesem Fall des Essays »Histoire de l'Allemagne«, erschienen 2014 bei Presses Universitaires de France. Auf ebenfalls etwa 150 Seiten schildert der Autor den holprigen Weg vom frühen 19. Jahrhundert zu Deutschlands heutiger Demokratie. Seine Erzählung beginnt mit dem Expansionsstreben Napoleon Bonapartes, das Europa zu einer Neuordnung zwang. Die napoleonischen Kriege förderten antimonarchistische und nationalis-

tische Bewegungen in der deutschen Bevölkerung. Mit der Gründung des föderalen Rheinbunds schließlich schaffte der französische Kaiser eine Pufferzone zu Preußen und Österreich, was schließlich dazu führte, dass das Heilige Römische Reich Deutscher Nation zerbrach.

Chapoutot führt seine Leser weiter durch die darauf folgende Restauration, die anschließende Märzrevolution und ihre Niederschlagung durch das preußische Militär, die dem Königreich Preußen die Vorherrschaft sicherte. Bis zum Ende des Ersten Weltkriegs regierten preußische Kaiser das Land. Auf die Weimarer Republik und vor allem auf den Nationalsozialismus geht Chapoutot nur kurz ein; er versucht hier vor allem zu analysieren, wie sich diese Zeit auf die deutsche Identität und die Politik der Nachkriegszeit auswirkte. Chapoutot betont die Entwicklung hin zu »einer freiheitlichen Demokratie im besten politischen Wortsinn, um die Frankreich die Deutschen nur beneiden kann«.

Alles in allem gelingt es den beiden Autoren, die deutsche Historie kurz zu skizzieren. Allerdings: 1200 Jahre Geschichte auf zirka 300 Seiten zu komprimieren, ist ein ambitioniertes Unterfangen, und das Ergebnis macht es den Lesern nicht immer ganz leicht. Das gilt vor allem für die älteren Epochen. Whaley hat sein Bestes getan, um die Zeit zwischen 800 und 1806 auf 153 Seiten zusammenzufassen. Doch er kann kaum verhindern, dass die kompakte Abfolge von Karls, Ottos und Heinrichs für Verwirrung sorgt. Andererseits kommt so sehr deutlich heraus, wie sich die Macht-

konstellationen zwischen Kaiser, Kurfürsten und Papsttum permanent änderten und welche politische Dynamik innerhalb des Reichs daraus erwuchs. Mehr Bilder und Karten hätten sicherlich dazu beigetragen, den Stoff anschaulicher zu vermitteln. Chapoutot hatte es da etwas einfacher. Zum einen, weil er für die 212 Jahre, die er beschreibt, ungefähr genauso viel Platz hatte wie Whaley. Zum anderen, weil den meisten Lesern dieser Zeitabschnitt vertrauter sein dürfte.

Empfehlen lässt sich der Band vor allem Menschen, die ihren geschichtlichen Überblick auffrischen wollen. Wer sich aber gezielt für bestimmte Zeitabschnitte interessiert, sollte zu anderen Werken greifen.

Die Rezensentin Verena Leusch hat Ur- und Frühgeschichte studiert und ist Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

MATHEMATIK EHE VERBESSERN UND KLEIDER SORTIEREN

Erfolgsautor Christian Hesse zeigt viele – nicht immer ganz ernst gemeinte – Möglichkeiten auf, mit Mathematik das tägliche Leben zu bewältigen.

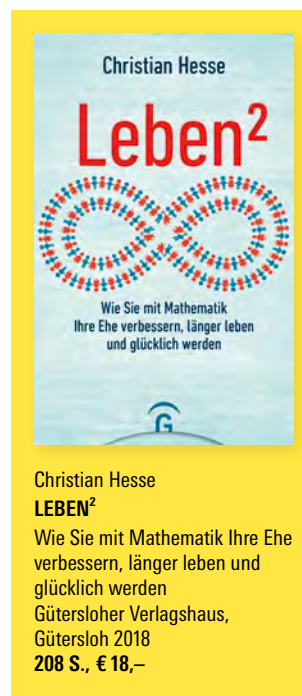
► Christian Hesse, Professor für mathematische Statistik an der Universität Stuttgart, ist ein sehr produktiver Buchautor und bei **Spektrum**

der Wissenschaft schon mehrfach rezensiert worden. In den zurückliegenden Jahren erschienen von ihm unter anderem die unterhaltsamen Bände »Mathe to go« (2017), »Math up your Life« (2016) und »Wer falsch rechnet, den bestraft das Leben« (2014).

Hesses Büchern liegt im Prinzip das immer gleiche Erfolgsrezept zu Grunde, nämlich eine Mischung aus drei Komponenten: einer interessanten Darstellung wissenschaftlicher Erkenntnisse, einer anschaulichen Erläuterung mathematischer Methoden und einer Sammlung skurriler Zeitungsmeldungen und unterhaltsamer Anekdoten. Der Titel des neuen Bands ist einmal mehr so gewählt, dass er neugierig macht. Der Verlag wirbt damit, dass die Ratschläge in dem Buch dazu beitragen könnten, glücklich zu werden. So kann es kaum überraschen, dass mancher Versandhändler das Werk nicht unter »Mathematik«, sondern in den Rubriken »Psychologischer Ratgeber/Selbstwertgefühl« oder auch »Job&Karriere/Motivation« führt.

Die 31 Geschichten des Bands sind – wie von Hesse gewohnt – unabhängig voneinander lesbar, auch wenn es sinnvoll erscheint, die vom Autor gewählte Reihenfolge beizubehalten. Das übersichtliche Inhaltsverzeichnis erklärt für jede der Geschichten, was es den Lesern bringt, sich damit zu beschäftigen. Hesses Schreibstil ist bekanntermaßen auf ein breites Publikum eingestellt und die Ausführungen somit gut verständlich.

Sachverhalte, die Laien erfahrungsgemäß kompliziert erscheinen, etwa bedingte Wahrscheinlichkeiten im Zusammenhang mit medizinischen Tests, erklärt der Autor anschaulich und anhand geeigneter Zahlenbeispiele. Sonst findet man nur wenige Ausführungen zum jeweiligen mathematischen



Hintergrund. Auch fehlen Grafiken, die so manchen Umstand noch besser verdeutlicht hätten – vermutlich deshalb, weil man befürchtete, damit Leser mit einer Mathephobie zu erschrecken.

Wer sich schon länger für die Anwendung von Mathematik im Alltag interessiert, wird auf etliche bekannte Themen stoßen, beispielsweise die Entlarvung gefälschter Zahlen in der Steuererklärung mit Hilfe des benfordschen Gesetzes. Natürlich fehlt auch der berühmte Hund nicht, der das ins Meer

geworfene Stöckchen stets längs eines optimalen Streckenzugs zurückholt, auch ohne die Differenzialrechnung zu kennen, die Menschen zu dessen Berechnung benötigen. Dennoch erfahren geneigte Leser manches Neue. Originell sind beispielsweise die Methoden, die Hesse vorschlägt, um Ordnung in den überfüllten Kleiderschrank zu bekommen. Er wendet hier die denkbaren (Aus-)Sortieralgorithmen der Informatik an: Nach dem Kauf eines neuen Hemds beispielsweise kann man entweder dasjenige ausmustern, das man am längsten nicht mehr angezogen hat (FIFO-Verfahren, von »first in, first out«); oder jenes, das man in der Vergangenheit am seltensten benutzte; oder auch dasjenige, das man voraussichtlich von allen als Letztes wieder benötigen wird.

Hesse macht seinem Ruf alle Ehre, skurrile Zeitungsmeldungen zu präsentieren. In der ersten Geschichte etwa, die sich mit gelingender Partnerschaft beschäftigt, berichtet er von einer Verwechslung zweier Bräute bei einer Doppeltrauung im arabischen Jeddah. Die irrtümlich geschlossenen Ehen, die daraus hervorgingen, konnten aber nach islamischen Recht nicht so einfach wieder aufgelöst werden. Einige Monate später meldeten die vier Vermählten, sie seien mit dem unerwartet zugeteilten Ehepartner zufriedener gewesen als mit dem ursprünglich vorgesehenen.

Am Ende des Buchs folgt eine alphabetisch geordnete Liste mit Hinwei-

REZENSIONEN

sen auf die (wissenschaftliche) Literatur, die den hesseschen Ratschlägen zu Grunde liegt. Die typischen Leser werden leider wohl nur in wenigen Fällen auf diese Quellen Zugriff haben. Zudem ist den Quellenangaben nicht anzusehen, welchen Bezug sie zu den Geschichten im vorderen Buchteil haben. Es macht unnötig viel Mühe, dies im Einzelfall herauszufinden, was ärgerlich ist, denn dies hätte sich mit Fußnoten leicht vermeiden lassen. Vor allem dieser Punkt dürfte wissenschaftlich interessierten Leser missfallen – trotz insgesamt unterhaltsamer Lektüre.

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

BIOLOGIE WAS MENSCH UND TIER (NICHT) TRENNT

Der Biologe Norbert Sachser propagiert ein neues Tierbild – und beseitigt verstaubte Dogmen.

Die »Krone der Schöpfung« hat endgültig ausgedient. Der postulierte Gegensatz zwischen dem vernunftgesteuerten *Homo sapiens* einerseits und dem instinktgesteuerten Tier andererseits sei schon lange nicht mehr haltbar, schreibt der Zoologe Norbert Sachser in diesem Buch. Fernab jeder Esoterik und Romantisierung skizziert er hier Erkenntnisse aus der Forschung, die in den zurückliegenden Jahrzehnten zu

einer »Revolution im Tierbild« geführt hätten, wie er schreibt. Sachser leitet das Institut für Verhaltensbiologie an der Universität Münster.

In sechs kurzweiligen Kapiteln fokussiert der Autor auf zentrale Forschungsaspekte und schlüsselt auf, was wir über das Verhalten unserer nächsten Verwandten wissen – oder zumindest wissen sollten. Wie hängen Stress und Sozialgefüge in Gruppen zusammen? Welche Emotionen sind von Tieren bekannt? Welchen Einfluss haben Gene und Umwelt darauf? Welche Bedeutung hat das Lernen? Und wie entwickeln sich Tiere zu Individuen mit eigener Persönlichkeit? Antworten darauf liefern vor allem Untersuchungen an Säugetieren. Meeresschweinchen sind, als Sachsers bevorzugtes Studienobjekt, in dem Buch besonders prominent vertreten.

Puzzlestück um Puzzlestück fügt der Autor ein neues Tierbild zusammen, das von außerordentlich komplexem und flexiblen Verhalten geprägt ist. Auf dem Weg dahin räumt er das eine oder andere verstaubte Dogma aus dem Weg. So wurden Tiere lange Zeit gewissermaßen als Bioautomaten angesehen: Ein spezifischer Reiz zog demnach unweigerlich ein bestimmtes Verhalten nach sich, das nach ewig gleich bleibendem Muster abließ. Diese Vorstellung ging Hand in Hand mit der Überzeugung, Tiere könnten nicht denken und über ihre Emotionen ließe sich keine Aussage treffen. »Heute hält diesel-



be Wissenschaft beide Aussagen für falsch und vertritt das genaue Gegenteil«, schreibt Sachser über die Kehrtwende seiner Disziplin. Immerhin hat sie sich damit als lernfähig erwiesen. Inzwischen weiß man: Manche Tiere zeigen nicht nur grundlegende Emotionen wie Furcht und Freude, sondern können auch planen, einsichtig handeln und sich sogar selbst im Spiegel erkennen. Sie sind lernfähig, und ihr Verhalten wird bis ins Erwachsenenalter durch Umwelt, Sozialisation und andere Faktoren beeinflusst.

Auch die vorgeburtliche Phase prägt, wie Sachser in einer Meerschweinchen-Studie belegt hat. Standen trächtige Tiere unter sozialem Stress, brachten sie maskulinisierte Töchter auf die Welt, die etwa den Balztanz der Männchen zeigten – den so genannten Rumba. Das Verhalten der Söhne dagegen war infantilisiert. Was bis vor Kurzem noch als Abweichung interpretiert worden wäre, sehen Biologen nun eher als erfolgreiche Anpassung.

Denn weniger scheue Jungweibchen können sich unter Stressbedingungen besser durchsetzen, während kindlich wirkende Männchen gefährliche Auseinandersetzungen mit ranghöheren Artgenossen vermeiden.

Tiere werden sowohl durch Erbanlagen als auch durch die Umwelt in ihrem Verhalten geprägt, was sie uns Menschen ähnlich macht. Von der Forschung ist nun gefordert, die Grenzen genauer auszuloten. Wer wissen möchte, wie weit die Wissenschaft dabei schon gekommen ist, ist mit »Der Mensch im Tier« bestens bedient. Die Kapitel lassen sich unabhängig voneinander lesen und bieten besonders eiligen Lesern jeweils ein kompakt gehaltenes Fazit am Ende. Einen triftigen Grund zum Schnelllesen bietet das Werk allerdings nicht, da die Lektüre sowohl informativ als auch vergnüglich ist.

Die Rezensentin Susanne Wedlich ist Biologin und arbeitet als Wissenschaftsautorin in Münster.

KULTUR VON FEUERSTEIN BIS URAN

Der Bergbau prägt die Menschheitsgeschichte seit der Jungsteinzeit, wie dieser Band darlegt.

Glück auf und nicht wieder hinab? Die letzten beiden Steinkohlezechen Deutschlands in Bottrop und Ibbenbüren (Nordrhein-Westfalen) stellen Ende des Jahres

2018 ihre Förderung ein. Für den deutschen Bergbau sicherlich eine Zäsur. Aber es werden hier zu Lande auch weiterhin Braunkohle sowie Steine, Erden und Industriemineralien wie Kali, Kaolin und Quarz abgebaut. Thematisch passend ist nun dieses Buch erschienen, das schon durch Gestaltung und Satz besticht. Unterstützt von mehr als 190 meist farbigen Abbildungen überzeugen die Autoren mit

Der Orden der Zisterzienser trug sehr zur Weiterentwicklung des Bergbaus bei

Kompetenz und lesefreundlichem Schreibstil.

Lars Bluma, Michael Farrenkopf und Stefan Przigoda geben einen einmaligen, reich bebilderten und für Laien verständlichen Einblick darein, wie Lagerstätten der Erze, Kohlen und Salze erkundet, erschlossen und gefördert werden. Auch mit der Entwicklung der Bergbautechnik und den bergmännischen Traditionen befassen sie sich. Ohne Kenntnis des Bergbaus lassen sich Industrialisierung und technischer Fortschritt nicht verstehen; zudem ist er seit vielen Jahrtausenden nachweislich eng verbunden mit der kulturellen und sozialen Entwicklung von Staaten und Gesellschaften.

Wissenschaftlich fundiert, aber dennoch verständlich führt der Band in die geologischen Prozesse ein, die zur Entstehung von

Erz-, Kohle- und Salzlagerstätten geführt haben. Auch gewährt er faszinierende Einblicke in den Bergbau früherer Hochkulturen Ägyptens, Roms und des Vorderen Orients. In den späteren Buchteilen fokussieren die Autoren allerdings auf die Entstehung und Entwicklung mitteleuropäischer Bergbauzentren und dann insbesondere auf den deutschen Bergbau.

Bevor das »Jahrhundert der Kohle« (von der Mitte des 19. Jahrhunderts bis zum Ende der 1960er Jahre) die jüngere Wirtschaftsgeschichte prägte, tat dies bereits der Bergbau mit der Wirtschaft der frühen Hochkulturen. Nicht umsonst sind Epochen der Menschheitsentwicklung nach den Rohstoffen Stein, Bronze und Eisen benannt. Die ältesten, in Afrika gefundenen Steinwerkzeuge datieren auf ein Alter von rund 3,4 Millionen Jahren. Obwohl organisierter Schacht- und Grubenausbau bereits etwa 30 000 v. Chr. in Oberägypten nachweisbar ist, finden sich erst im Neolithikum bei sesshafter Lebensweise vielerorts gezielte Bergbauaktivitäten. Das im niederbayerischen Abensberg-Arnhofen gefundene Feuersteinbergwerk beispielsweise war mit 120 000 Schächten eine der größten neolithischen Gewinnungsstätten für Feuerstein in Europa!

Mit dem 12. Jahrhundert begann eine konjunkturelle Hochphase bergbaulicher Aktivitäten, wie aus dem Buch hervorgeht. Der Mönchsorden der Zisterzienser expandierte über ganz Westeuropa, weil er

kontemplative religiöse Innerlichkeit und praktisch-handwerkliche Tätigkeiten in seinem Arbeitsethos vereinte und damit Laien, Handwerker, Bauern, Berg- und Hüttenleute anlockte. Zu dem Orden gehörten nicht nur landwirtschaftliche Betriebe, sondern auch technisch hochentwickelte Bergwerke, Schmelzhütten und Hammerwerke vielerorts in Europa. So entwickelte sich ein komplexes europäisches Ordensnetzwerk, in dem ein intensiver Wissenstransfer zu bergbaulichen und hüttenmänn-



Lars Bluma, Michael Farrenkopf, Stefan Przigoda
GESCHICHTE DES BERGBAUS
L&H, Berlin 2018
288 S., € 25,-

nischen Verfahren stattfand – angeregt durch die klösterlichen Bibliotheken. Der Harz, das Erzgebirge, Böhmen und die Ostalpen legen noch heute eindrucksvolle Zeugnisse ab vom Leben in den spätmittelalterlichen Bergbauregionen und den Städten dort, die bald einen rechtlichen Sonderstatus einnahmen. Sagen und Mythen, Alchemie und Christentum prägten die Ansichten der Bergleute, was die Autoren anhand

von mehreren Beispielen anschaulich zeigen.

Die Geschichte der Bergbautechnik ist eng verbunden mit den besonderen Gefahren und Sicherheitsanforderungen dort. Aus der Lektüre geht hervor, dass Mechanisierung und Elektrifizierung die Ausbeutung der Lagerstätten immer stärker vorantrieben. Das Elend der typischen Berufskrankheiten, die oft unzureichende Arbeitssicherheit unter Tage und das zunehmende Selbstbewusstsein der Bergleute sorgten dafür, dass sie sich in Knapp- und Berufsgenossenschaften zusammenschlossen und risikomindernde Schlagwetterkommissionen einrichteten. Knappen-, Bergarbeiter- und Bürgervereine schufen ein buntes gemeinschaftsbildendes Brauchtum, das in Feierlichkeiten mit eigens dafür verfassten Liedern und Gedichten sowie in uniformierten Bergparaden heute noch fortlebt.

Die letzten Buchkapitel behandeln Probleme des heutigen Bergbaus, etwa im Kongo, wo Menschen mit bloßen Händen Gold mit Quecksilber auswaschen. Weiträumige und tiefe Eingriffe in die Umwelt – von der Erdoberfläche bis zu den Tiefseeböden – sprechen die Autoren genauso an wie Bergsenkungen und die Suche nach Zwischen- und Endlagern für radioaktive Abfälle. Ein Ausblick auf die Zukunft des deutschen Bergbaus und die Bewältigung so genannter Ewigkeitslasten schließen das Werk ab. Das Buch ist Interessierten rundum zu empfehlen.

Der Rezensent Manfred Feyk ist Diplomgeograf, Geoinformatiker und Journalist (FJS) in Bovenden.

STÜRZT DAS ELEKTRO-PHYSIOLOGISCHE WELTBILD?

Nach Ansicht des Physikers Thomas Heimburg leiten Nerven Signale nicht elektrisch, sondern durch Druckwellen weiter. (»Das mechanische Gehirn«, *Spektrum* September 2018, S. 12)

Horst J. Koch, Schneeberg: Der Artikel erschüttert das bisherige elektrophysiologische Weltbild, das sich seit den 1950er Jahren fest etabliert hat. Viele neuronale Phänomene lassen sich mit dem Fluid-Mosaik-Modell und den Ionenkanälen sehr gut erklären. Nicht zuletzt spielen in der Neurologie Kanalerkrankungen eine wichtige Rolle.

Ein interessanter Aspekt ist die Rolle der Druckwelle beim epileptischen Anfall. Wäre es denkbar, dass sich eine stehende Welle ausbildet?

Elektrische und mechanische Phänomene sind Grundlagen der neuronalen Aktivität und lassen sich aus biophysikalischer Sicht nicht wegdiskutieren. Potenzial, Druck oder Temperatur korrelieren wahrscheinlich, ohne dass wir den Zusammenhang bisher genau kennen. Es bleibt spannend, wie sich das »elektromechanische Modell« – in Analogie zu den elektromagnetischen Wellen – weiterentwickelt.

Christian Nienhaus, Ulm: Mit der Behauptung im letzten Absatz des Artikels, nur seine Hypothese der mechanischen Druckwellen als einzige Form der Reizweiterleitung bei einem Neuron sei richtig, ignoriert Thomas Heimburg den Aufbau von Nervenzellen. Die Axone der meisten Nervenzellen sind von einer Myelinscheide (auch Markscheide genannt) umgeben, die den Nervenfortsatz unter anderem elektrisch isoliert. Bei manchen Krankheiten, zum

Beispiel multipler Sklerose, wird diese Isolationsschicht durch das eigene Immunsystem angegriffen und abgebaut. Die Ionenkanäle müssen also an der Ausbildung eines Aktionspotenzials beziehungsweise an der Signalweiterleitung zumindest beteiligt sein. Mit seiner Behauptung, das klassische Hodgkin-Huxley-Modell wäre falsch, weil die Biologen das Thema nur von ihrem Fachgebiet aus betrachten, argumentiert Heimburg eben so, wie er es seinen Kollegen aus der Biologie vorwirft. Eine gemeinsame, also elektrische und mechanische Ursache scheint auf Grund der im Artikel aufgeführten Informationen doch wahrscheinlicher zu sein.

Johannes Zauner, per E-Mail: In der Einführung ist zu lesen, dass bei einer 5-Watt-Glühbirne 40 Milliampere fließen. 40 Milliampere bei einem 5-Watt-Verbraucher benötigen 125 Volt an Spannung. Hat sich Kopenhagen (der Ort der beschriebenen Handlung) aus dem europäischen Verbundnetz mit 240 Volt ausgekoppelt?

Antwort der Redaktion:

Sie haben vollkommen richtig gerechnet. In dem Artikel ging unser Autor Douglas Fox vom US-amerikanischen Netz aus, das tatsächlich eine Spannung von 120 Volt bereitstellt. In Kopenhagen herrscht wie überall in Europa eine Netzspannung von etwa 230 Volt. Damit fließen 40 Milliampere durch eine 10-Watt-Glühbirne.

KEINE IDEALE LÖSUNG

Die »Chemischen Unterhaltungen« propagierten die Umwandlung von Ökostrom in Methan, um wetterbedingte Schwankungen bei seiner Erzeugung abzufedern. (»Elektrochemischer Speicher für grünen Strom«, *Spektrum* September 2018, S. 62)

Peter Notni, Jena: Die im Beitrag beschriebene Aufrüstung des durch Elektrolyse gewonnenen Wasserstoffs zu Methan dient im Wesentlichen der besseren Handhabung der Gase. Das geht auf Kosten der geringeren Energieausbeute bei der Wiedergewinnung der eingesetzten Strommenge. Sehr missverständlich ist deshalb die dort gemachte Aussage »Im energetischen Vergleich der beiden Reaktionsprodukte des Power-to-Gas-Prozesses hat Methan gegenüber Wasserstoff die Nase vorn. Verbrennt man Methan zu CO₂, wird etwa dreimal so viel Energie frei wie bei der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser.« Dann hätten wir ja ein Perpetuum mobile. Der Satz stimmt vermutlich für gleiche Volumina der Gase, da CH₄ nur ein Viertel des Volumens des zur Herstellung verwendeten H₂ hat. Dann müsste es allerdings das Vierfache an Energie sein; das weist auf die Verluste bei der Umwandlung von H₂ zu CH₄ hin.

Leider steckt die unmittelbare Verwendung von H₂ zur Energiegewinnung noch an vielen Stellen in den Kinderschuhen. Die Umwandlung in Methan ist zusätzlich beson-



Leserbriefe sind willkommen!

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

ders unangenehm, da Methan eine vielfach höhere Klimawirkung hat als das der Luft entzogene CO_2 , so dass schon bei kleineren Gasverlusten, zum Beispiel bei unvollständiger Verbrennung oder bei Lecks, das ganze Vorgehen nicht mehr klimaneutral ist.

Walter Weiss, Kassel: Ernten die Erneuerbaren Sonne und Wind mehr Strom, als gerade verlangt wird, so sind es tatsächlich nicht die derzeit für E-Autos zur Verfügung gestellten Akkus, die für die Speicherung des Überstroms ernsthaft in Frage kommen, denn diese Akkus haben keine gute Energieeffizienz und enthalten als wesentlichen Bestandteil seltene Erden, die bekanntlich nur in endlichen Mengen vorkommen und in Ländern gefördert werden, die regelrechte Sklavenarbeit einsetzen.

Das Verfahren Power-to-Gas eignet sich besser für die Speicherung des Überstroms, und das dabei gewonnene Methan lässt sich in die überall in Deutschland vorhandenen Gasleitungen einspeisen. Durch das »Power-to-Liquid« kann sogar flüssiger Betriebsstoff gewonnen werden. Dabei setzt man den aus der Elektrolyse von Wasser erhaltenen Wasserstoff mit Kohlendioxid aus der Luft zu Methanol um. Dieses ließe sich ohne Weiteres lagern – was ja bei gasförmigen Kraftstoffen auf Schwierigkeiten stößt.

VON DER KOMPETENZ ZUR INKOMPETENZ

Die Mathematikdidaktiker Ysette Weise und Rainer Kaenders äußerten Zweifel, ob die nach dem Pisa-Schock eingeführten Bildungsstandards sinnvoll sind. (»Die Kompetenzfalle«, *Spektrum* September 2018, S. 80)

Thorsten Imkamp, Bielefeld: Die im Artikel dargestellte Problematik kann ich aus der Praxis zu 100 Prozent bestätigen. Zum einen wird die Mathematik durch teilweise unsinnige Kontexte vernebelt. Da ist von »Modellierungsaufgaben« die Rede, obwohl eine Modellfunktion vorgegeben wird, die häufig noch nicht einmal angemessen ist. Mit echter Modellierung, einem enorm komplexen Prozess, hat dies nicht das Geringste zu tun. Zum anderen

ersetzen Abituraufgaben Qualität durch Länge mit unnötig viel Text. Nur auf die »Kompetenz«, derartige Aufgaben zu lösen, wird häufig hingearbeitet.

Rudolf Ahr, Weilheim: Der zitierten Stellungnahme von Kristina Reiss (Projektleiterin der Pisa-Studie 2018) folgend, sollte das Abiturzeugnis dringend umbenannt werden von »Zeugnis der Allgemeinen Hochschulreife« in »Gymnasialer Kompetenznachweis«, damit in Zukunft niemand mehr auf die Idee kommt, das Abschlusszeugnis des Gymnasiums hätte etwas mit Studierfähigkeit zu tun.

Helmut Zinner, Haar: In einem Punkt möchte ich die Kritik am Mangel an Anwendungskontext und an Modellierungsdefizit etwas abschwächen: In zwei bayerischen Lehrbüchern finde ich Aufgaben des Typs: »Konstruieren Sie eine Auffahrtsrampe« (Länge und Höhe gegeben, sonst nichts) oder: »Ermitteln Sie die Trajektorie einer Kugel, die zwischen zwei sich schneidenden Ebenen rollt«. Meines Erachtens schon eine Herausforderung für 17- bis 18-Jährige. Auch in der Stochastik findet man zahlreiche Anwendungsaufgaben, zum Beispiel für medizinische Tests. Das Problem ist, dass die Schüler diese Aufgaben hassen und versuchen, einen großen Bogen darum zu machen – und offensichtlich von den Lehrern darin bestärkt werden.

Gunter Heim, Aachen: Der beschriebene Befund fehlender Grundkenntnisse und Konzepte ist noch nicht dramatisch genug formuliert. Ich arbeite in einer Lernwerkstatt (Nachhilfe) für Mathematik, Physik und Chemie. Zu unseren Kunden zählen Kinder ab der Klasse 1 bis zu Studenten in den unteren Semestern. Bei neuen Schülern stellen wir immer die folgende Frage: Was gibt 712 geteilt durch 4? In mehr als der Hälfte der Fälle bleibt die Aufgabe auch mit beliebig viel Zeit unlösbar. Das gilt für Viertklässler mit Matheproblemen genauso wie für Ingenieurstudenten im zweiten Semester mit guten Mathe-schulnoten. Eine typische Begründung ist, dass man 7 nicht durch 4 teilen könne, also sei auch 712 nicht durch 4 teilbar.

Vielleicht ist nicht das Konzept der Kompetenzorientierung so sehr das Übel. Nach unserer Erfahrung ließe sich viel erreichen, wenn der Stoffumfang (stark) reduziert wird, so dass Zeit für ein planvolles Training in Kombination mit echten Anwendungsaufgaben frei wird. Damit machen wir die besten Erfahrungen.

ERRATUM

»Die Kompetenzfalle«, *Spektrum* September 2018, S. 80

In der Wiedergabe der Metaufgabe im Kasten »Distraktori-sche Kontexte in Abituraufgaben« ist ein Schreibfehler. In der vierten Zeile muss es heißen » U_1 entlang der Geraden g_1 , U_2 entlang der Geraden g_2 « (nicht g_1). Volker Bartheld hat uns auf diesen Fehler aufmerksam gemacht.

futur III

Hart an der Grenze

Unterwegs mit Danny Whiskers.

Eine Kurzgeschichte von Fawaz Al-Matrouk

Zehn Meilen vor der kanadischen Grenze wurden sie von der Polizei angehalten.

»Du hältst die Klappe«, befahl Dr. Tarboush. Seine Hände wurden ganz weiß, so stark krampften sie sich um das Lenkrad.

»Warum bist du auch gefahren wie ein Irker«, maulte der Kater in der Transportbox auf dem Beifahrersitz. Sein Name war Danny Whiskers.

Dr. Tarboush spürte das Blut in seinen Händen pochen, während er im Rückspiegel zusah, wie der Polizist näherkam. »Ich habe gesagt, du sollst die Klappe halten!«

»Hältst du mich etwa für dumm?«, fragte Danny entrüstet. »Ich weiß, wann ich schweigen soll.«

»Hallo, Wachtmeister«, grüßte Dr. Tarboush betont freundlich und versuchte, seine Hände zu entspannen.

Der Polizist hielt Abstand. »Führerschein und Zulassung bitte.«

Dr. Tarboush stöberte im Handschuhfach. Es quoll über: Rechnungen, Umschläge, Seiten aus einem Fachartikel über die Epigenetik der Intelligenz.

»Ein Moment noch«, murmelte er und durchsuchte den Blätterhaufen.

»Ich hab's irgendwo.«

»Du meine Güte«, flüsterte Danny.

»Sei still!«

»Deinetwegen werden wir erschossen.«

»Wer ist hier die sprechende Katze?!«

Das hatte der Polizist gehört. »Wie bitte?«

»Pardon, Wachtmeister, ich führe nur Selbstgespräche. Gefunden!« Dr. Tarboush zeigte die Papiere.

Der Polizist runzelte die Stirn.

»Warten Sie.«

Dr. Tarboush beobachtete im Rückspiegel, wie der Polizist zum Streifenwagen schritt. Schweißtropfen sammelten sich auf seinen buschigen Brauen. »Er ahnt etwas.«

»Na toll. Noch zehn Meilen bis Kanada, und du lässt mich umbringen.«

»Nur weil du nie die Klappe halten kannst.«

»Nur weil du immer den Fahrstreifen wechselst.«

»Das passiert, wenn ein Kater plötzlich aus seiner Box ausbricht und« – jetzt wurde Dr. Tarboush unwillkürlich lauter – »andere Verkehrsteilnehmer unflätig beschimpft!«

»Na, damit pfuscht man Gott ins Handwerk. Man sollte es verbieten«

»Wissen die nicht, was eine Überholspur ist?«

»Weißt du nicht, was ein Flüchtling ist?«

»Das weiß ich. Ich bin nicht dumm.«

»Ich kriege zehn Jahre für nicht genehmigte gentechnische Experimente.«

»Weiß ich.«

»Und du erlebst, auf wie viele Arten man etwas wie dich häuten kann.«

»Hör auf.«

»Ich hätte dich im Labor zurücklassen sollen, dann könnte ich in Kanada von dir in der Zeitung lesen und Kamillentee trinken. ›Sprechende

Katze!«, ›Monströses Experiment!«, ›Mieze hält herzerreißenden Monolog, während die Wissenschaftspolizei das Tier einschläf...‹ – Weinst du etwa?«

Danny schluchzte eindeutig. »Ach woher denn.«

»Hör auf zu weinen.«

»Das ist nicht fair«, klagte der Kater. »Ich wurde nicht gefragt. Ich hab nicht darum gebeten, klug zu sein. Noch vor einer Woche war ich ganz legal. Warum mussten sie die Gesetze ändern? Warum können sie mich nicht in Ruhe lassen?«

Dr. Tarboush wand sich im Fahrersitz. Trösten war nicht seine Stärke.

»Ich weiß es nicht, Danny.«

»Es ist einfach nicht fair.«

»Finde ich auch ... Die Leute bekommen Angst und erlassen Gesetze und ruinieren damit das Leben von anderen Leuten und begreifen nicht, wie.«

Danny schniefte. »Das Leben von anderen Leuten?«

»Oh ja.«

»Meinst du mich mit den anderen Leuten?«

»Aber sicher.«

Danny erlaubte sich ein Lächeln. »Aber schlauer als die anderen Menschen.«

»Zum Teufel mit ihnen.«

Danny lachte. Dr. Tarboush steckte seine Finger durch das Metallgitter der Transportbox. »Komm her.«

Danny lehnte sich gegen die Finger und ließ sich am Hals kraulen. Er begann zu schnurren.

»So ist's brav, mein Junge«, sagte Dr. Tarboush.

»Sei nicht herablassend«, mahnte Danny und schnurrte.

Feste Stiefelschritte kündigten die Rückkehr des Polizisten an. Dr. Tarboush setzte sich gerade hin. Der Polizist steckte den Kopf ins Auto und warf einen gelben Strafzettel auf den Papierhaufen.

»Ich nehme an, dorthin soll er«, sagte er.

»Genau.«

»Das ist für Fahrbahnwechsel ohne Blinksignal.«

Dr. Tarboush nickte. »Verstanden.«

»Ist das Ihre Katze?«

»Jawohl.«

»Niedlich.«

Danny stöhnte in seiner Box. Dr. Tarboush spürte, wie ihm das Herz in die Hose rutschte.

Der Polizist lächelte. »Wissen Sie, manche Leute machen komische Tierversuche. Verändern die Gene und so. Irgendwas, was Crispy heißt.«

Danny hüstelte verächtlich.

Dr. Tarboush hüstelte zur Tarnung.

»Machen Sie sich lustig über mich?«

»Aber nein, Wachtmeister. Wegen Crispy«, seine Stimme brach. »Das ist halt einfach eine dumme Idee.«

Der Polizist verengte die Augen. »Warum dumm?«

Dr. Tarboush räusperte sich.

»Na, damit pfuscht man Gott ins Handwerk. Man sollte es verbieten.«

»Es ist verboten.«

»Wirklich?«

»Streng verboten. Harte Strafen. Gerade fliehen zwei davor. Ein alter Mann und seine Katze, zuletzt gesehen in nördlicher Richtung aus Kalifornien. Gesprächige Katze. Beschrieben als »eingebildet.«

»Eingebildet!« Die Entrüstung war in Danny Whiskers' Stimme nicht zu überhören.

Dr. Tarboush schlug seine Stirn gegen das Lenkrad. Der Polizist sagte: »Das war die Katze.«

»Wachtmeister, ich bin ein Bauchredner. Ich kann die Stimme vorstellen.«

»Sie und ein Bauchredner«, lachte der Polizist. »Dr. Taha Tarboush. Doktor in Bauchrednerei. Oder sagt man Ventriloquistik? Wer weiß. Mir egal. Zurück zum Thema. Sie behaupten also, mit der Gentechnik pfuscht man Gott ins Handwerk. Ich aber sage« – er lehnte sich weit ins Auto und flüsterte – »mein Vater hat Alzheimer, und ich warte endlich auf einen Durchbruch. Viel Glück!«

Mit diesen Worten ging der Polizist davon. Dr. Tarboush fühlte sein Herz schlagen, sechsmal für jeden Stiefelschritt. »Aber nicht rasen!«, rief der Polizist von seinem Streifenwagen.

»Was war das gerade?«, fragte Danny Whiskers.

»Ich denke, wir hatten Glück.«

»Ich meine, die Wahrheit hat gesiegt.«

»Na ja.«

»Ich bin die Wahrheit«, dozierte Danny. »Ich habe gesiegt.« Dr. Tarboush wandte sich seinem Beifahrersitz zu. »Zehn Meilen bis zur Grenze,

Danny. Noch ein Mucks, und du bist ein streunender Kater.«

»Auch kein Schnurren?«

»Danny.«

»Miauen?«

»Halt die Klappe.«

»Und wenn mir der Schweif einschläft? Darf ich dir das mitteilen? Darf ich meine Box verlassen? Was ist, wenn es juckt? Wenn ich mich kratzen muss? Kratzen ist ein Geräusch. Darf ich mich kratzen?«

Während der zehn Meilen bis zur Grenze herrschte keinen Moment Schweigen zwischen ihnen. Erst als sie British Columbia erreicht hatten, fiel Danny Whiskers in tiefen Schlaf.

nature

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 560, S. 136, 2. August 2018

DER AUTOR

Fawaz Al-Matrouk liebt die modernste Technik, schreibt aber lieber mit der Hand. Von Beruf ist er Regisseur und arbeitet an seinem ersten Spielfilm.

Spektrum
der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

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

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Claudia Hecker, Dr. Rainer Kayser, Dr. Michael Springer.

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

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

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

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

Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

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

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 39 vom 1.1.2018.

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

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

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

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

ISSN 0170-2971

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



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



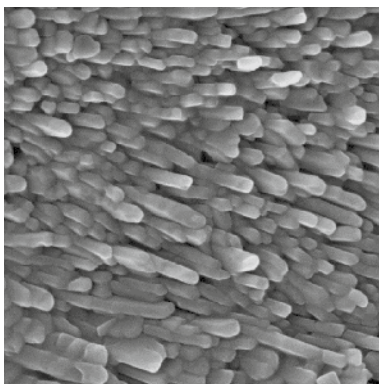
VORSCHAU



AGSANDREW / GETTY IMAGES / ISTOCK

WIE REAL IST DIE QUANTENWELT?

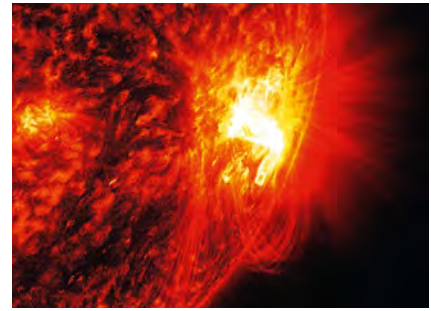
Viele Physiker meinen: Quantenobjekte werden erst im Moment ihrer Messung zur Wirklichkeit, zu Welle oder Teilchen. Bei einem ausgeklügelten Versuchsaufbau stellte sich aber überraschend heraus, dass uns vielleicht gewisse innere Eigenschaften subatomarer Systeme verborgen bleiben, die viele etablierte Vorstellungen auf den Kopf stellen würden. Seither bemühen sich Forscher, das Schlupfloch wieder zu schließen – und die bekannten Regeln der Quantenmechanik zu retten.



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ZEHEFORSCHUNG GÜRBH

ZAHNMEDIZIN

Auch bei guter Pflege lassen sich Munderkrankungen nicht völlig ausschließen. Durch Nachahmen der Natur versuchen Forscher, geeigneten Zahnersatz zu entwickeln – etwa aus Hydroxylapatit mit der gleichen 3-D-Struktur und den gleichen mechanischen Eigenschaften wie bei natürlichen Zähnen.



NASA/SPO (WWW.NASA.GOV) / THE GORHAM / SPO OBSERVES MORE FLARES ERUPTING FROM GIANT SUNSPOTS

DER STAMMBAUM UNSERER SONNE

Indem sie die Verteilungen von Elementen im All und die Bewegungen anderer Sterne untersuchen, entschlüsseln Astronomen die Vergangenheit der Sonne. Sie haben sogar einen Stern entdeckt, der wohl gemeinsam mit ihr entstanden ist.

NEUE SERIE MIGRATIONSGESCHICHTE



CHRISTIAN KJØCH MØRSEN

GRÖNLANDS WIKINGER

Um das Jahr 985 gründeten Nordmänner Siedlungen auf der größtenteils vergletscherten Arktisinsel. Was lockte die Auswanderer in eine so unwirtliche Welt? Vielleicht war es die Hoffnung auf eine lukrative Jagdbeute: Walrosselfenbein.

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

KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

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

€ 4,99
je Ausgabe



Bestellmöglichkeit und mehr als 180 weitere Ausgaben:
www.spektrum.de/kompakt



Sie möchten Lehrstühle oder Gremien besetzen? Sie suchen weibliche Experten, Gutachter oder Redner zum Thema?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 2.700 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

