

Spektrum

der Wissenschaft

DAS NICHTS

Astronomen
inspizieren den leersten
Ort im Universum

KLIMAWANDEL Risikofaktor Permafrost

KEIMBAHNTERAPIE Menschendesign durch die Hintertür

FAHRRAD 200 Jahre rollende Revolution

Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur € 0,92 pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur € 0,69. (Angebotspreise nur für Privatkunden)



www.spektrum.de/abonnieren



EDITORIAL REVOLUTIONEN ALLER ART

Von Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Seit Jahren fahre ich meist mit dem Fahrrad zur Arbeit, sofern die Wetterverhältnisse nicht allzu wüst sind. Aber als letztes Jahr Verlag und Redaktion umzogen, hatte dies für mich einen bedauerlichen Nebeneffekt: Mein Anfahrtsweg wurde fast doppelt so lang. Das machte das Strampeln auf die Dauer dann doch etwas mühsam; ich war halt noch nie ein großer Sportler. Trotzdem: Radfahren ist eine wunderbare Art, sich fortzubewegen – und obendrein die energetisch effizienteste, die der Mensch je entwickelt hat. Mit ihr setzen wir rund ein Viertel der mit unserem Stoffwechsel erzeugten Energie in eine mechanische Form um, die uns vorwärtsbringt. Dieser Wirkungsgrad liegt wesentlich höher als etwa beim Gehen oder Laufen. Weitere faszinierende Details zu den physikalischen Besonderheiten des Radfahrens finden Sie ab S. 74 in einer Spezialausgabe unserer beliebten Rubrik »Schlichting!« anlässlich des 200. Geburtstags des Zweirads in diesem Jahr.

Wir erahnen heute kaum mehr, welche Revolution das Laufrad des Karl Drais 1817 darstellte. Unter anderem baute der Erfinder deshalb keine Pedale ein, weil es seinen Zeitgenossen schon unheimlich genug vorkam, auf dem schmalen Gefährt mit nur zwei Rädern zu balancieren. Dann auch noch die Füße vom Boden zu nehmen, wäre eine zu große Zumutung gewesen (S. 62)!

Eine Revolution ganz anderer Art dürfte uns bald in der Medizin bevorstehen. Eigentlich wollen die beteiligten Forscher nur eine verbreitete Form von Unfruchtbarkeit bei Männern heilen. Aber da sie dazu die DNA in Spermienzellen verändern werden, führt das Verfahren sozusagen über die Hintertür die ethisch höchst umstrittene Keimbahntherapie ein, bei der künstlich eingebrachte Mutationen an alle nachfolgenden Generationen weitergegeben werden. Damit würde das menschliche Erbgut dauerhaft modifiziert. Inzwischen ist dazu eine Debatte zwischen Forschern, Juristen und Ethikern angelaufen (S. 40).

Mein Radfahrproblem habe ich übrigens dank einer kleinen privaten Revolution gelöst: Mit einem E-Bike lässt sich die längere Anfahrtsstrecke problemlos bewältigen.

Herzlich, Ihr



NEU AM KIOSK AB 17.3.!

Über Highlights der Erforschung unserer Vergangenheit lesen Sie im **Spektrum Spezial** Archäologie – Geschichte – Kultur 1.17.

AUTOREN DIESER AUSGABE



ISTVÁN SZAPUDI

Der Astronom interessiert sich für Abweichungen in der kosmischen Hintergrundstrahlung. Aus einem kalten Fleck darin schließt er auf einen riesigen Bereich im All nahezu ohne jede Materie (S. 12).



RÜDIGER RIESCH

Der Evolutionsbiologe erforscht Artbildung bei heutigen Fischen und Säugetieren. Dass die Schwertwale – Orcas – vermutlich gerade dabei sind, sich in mehrere Arten aufzuspalten, beschreibt er ab S. 30.



TED SCHUUR

In der Wildnis Alaskas untersucht der Ökologe seit Jahren, wie stark der Klimawandel die Polarregion verändern wird. Ab S. 48 erklärt er, welche Gefahr dabei von tauenden Permafrostböden ausgeht.

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Offene Wunde des Mars

Folie kühlt im prallen
Sonnenlicht

Das Geheimnis der
Rorschach-Formen

Magnetfeld im Tonkrug

Streuung von Licht an Licht

Schnelle Erholung nach
Massensterben

Lebende Malariaparasiten
als Impfstoff

20 FORSCHUNG AKTUELL

Golfstromsystem in Gefahr?

Zweifel an der Stabilität
der atlantischen Umwälz-
strömung

Kampf dem Kratzzwang

Für Juckreiz sind bestimmte
Neurone verantwortlich

Verschwundenen Gold- lettern auf der Spur

Archäologen rekonstruieren
monumentale Inschriften

Krieg der Viren

Einige Riesenviren werden
ihrerseits von parasitären
»Virophagen« befallen

29 SPRINGERS EINWÜRFE

Demokratie mit Zusatzjoker

Ein Trick hilft der Schwarm-
intelligenz auf die Sprünge

74 SCHLICHTING!

200 Jahre Zweirad

Konkurrenzlos sparsam

Radfahren – die effizienteste
Fortbewegungsart

77 IMPRESSUM

85 FREISTETTERS FORMELWELT

Keine Raumfahrt ohne Mathematik

Mit dem Euler-Verfahren
in die Erdumlaufbahn

12 KOSMOLOGIE **DIE GROSSE LEERE**

Ein merkwürdiger kalter Fleck auf der Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung deutet auf eine gewaltige Region im All praktisch ohne jede Materie hin.

Von István Szapudi

30 EVOLUTION **ORCAS – ARTBILDUNG EINMAL ANDERS**

Spaltet sich der Große Schwertwal, *Orcinus orca*, derzeit in mehrere Arten auf? Forscher vermuten das, weil sich die einzelnen Gruppen meiden und ganz verschieden verhalten – teils sogar im selben Lebensraum.

Von Rüdiger Riesch

40 KEIMBAHNTERAPIE **MENSCHENDESIGN DURCH DIE HINTERTÜR**

Serie: Die Zukunft der Menschheit (Teil 4) Um männliche Unfruchtbarkeit zu therapieren, planen Mediziner Spermienzellen genetisch zu verändern. Das würde ethisch betrachtet jedoch eine rote Linie überschreiten.

Von Stephen S. Hall

48 KLIMAWANDEL **TAUENDE TUNDRA**

Permafrostböden in der Arktis könnten gewaltige Mengen an Treibhausgasen freisetzen. Mit einer aufwändigen Messkampagne haben Forscher nun ermittelt, wie stark das die globale Erwärmung anfachen würde.

Von Edward A. G. Schuur

54 ASTRONOMIE **EIN FEUERWERK EXPLODIERENDER STERNE**

Jahr für Jahr beobachten Astronomen tausende höchst unterschiedliche Sternexplosionen. Welche astrophysikalischen Prozesse stecken dahinter?

Von Daniel Kasen

62 TECHNIKGESCHICHTE **KARL DRAIS – DAS VERGESSENE GENIE**

200 Jahre Zweirad Das Zweirad galt lange als Kind vieler Väter und Nationen, der Entwickler der badischen »Laufmaschine« als Außenseiter. Ein Fehler, wie zeitgenössische Quellen offenbaren.

Von Hans-Erhard Lessing

68 SOZIALGESCHICHTE DES FAHRRADS **VOM ADELSSPIELZEUG ZUM MASSENVERKEHRSMITTEL**

200 Jahre Zweirad Spielzeug reicher junger Männer, Vehikel der Emanzipation, Kennzeichen der autolosen Habenichtse und ökologisch unbedenkliches Verkehrsmittel: Das Fahrrad hat eine wechselvolle Geschichte – und eine glänzende Zukunft.

Von Thomas Kosche

78 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **IST 0,999999... = 1 ?**

Ja, sagt die klassische Theorie. Nein, sagt der aufsässige Schüler. Das ist nicht zu widerlegen. Aber es bringt auch nichts.

Von Jean-Paul Delahaye



12

TITELTHEMA
DIE GROSSE LEERE



30

EVOLUTION
ORCAS – ARTBILDUNG
EINMAL ANDERS



48

KLIMAWANDEL
TAUENDE TUNDRA

SCHWERPUNKT
200 Jahre
Zweirad

62

TECHNIKGESCHICHTE
KARL DRAIS –
DAS VERGESSENE GENIE



86 REZENSIONEN

Georg Glaeser, Hannes F. Paulus, Werner Nachtigall:

Die Evolution des Fliegens

Dietmar Herrmann:

Mathematik im Mittelalter

Mark Miodownik:

Wunderstoffe

Günter Spanner:

Das Geheimnis der Gravitationswellen

Pacino di Bonaguida:

Buch der Bilder

Volker Reinhardt: Pontifex

93 ZEITREISE

Vom römischen Wein zum Elektronengehirn

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

UWU-XP4 macht den Turing-Test

Auch ein gutes Gespräch kann tödlich enden

98 VORSCHAU

Titelbild: iStock / agsandrew; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft



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

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

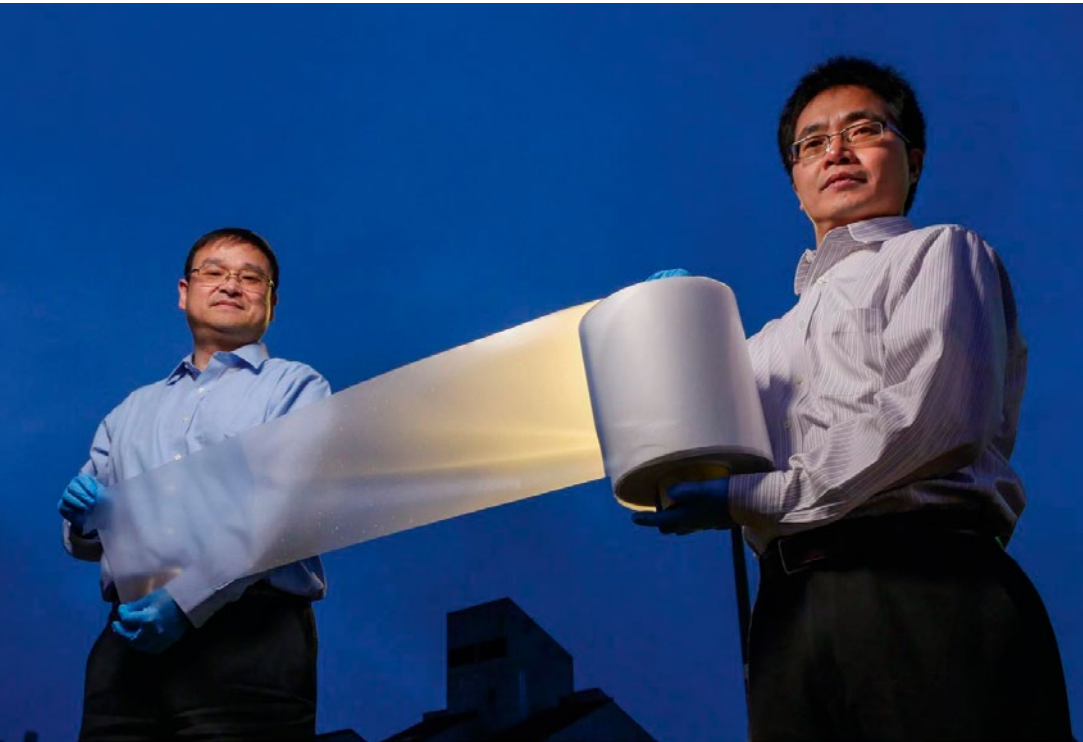
SPEKTROGRAMM





OFFENE WUNDE DES MARS

► Sand und Felsbrocken bedecken große Teile der Oberfläche unseres roten Nachbarplaneten. Manchmal zeigt sich aber auch das blanke Grundgestein, wie in diesem etwa 500 Meter breiten Bereich am südlichen Rand eines Kraters. Das Foto hat die hochauflösende HiRISE-Kamera an Bord der NASA-Raumsonde Mars Reconnaissance Orbiter im Januar 2017 aufgenommen. Die Falschfarbendarstellung hebt den Fels rötlich hervor; teilweise haben sich darauf Dünen aus feinem Sand abgelagert. Solche Regionen sind für Wissenschaftler besonders interessant, da sie ihnen Einblicke in die geologische Vergangenheit des Mars ermöglichen.



GLENN ASAKAWA / UNIVERSITY OF COLORADO IN BOULDER

Die Materialforscher Xiaobo Yin und Ronggui Yang präsentieren ihre neu entwickelte Kunststoffolie, die erstaunliche Kühlleistungen verspricht.

MATERIAL- WISSENSCHAFT FOLIE KÜHLT IM PRALLEN SONNENLICHT

► Mit einer neu entwickelten Kunststoffolie lassen sich Oberflächen passiv kühlen – sogar im direkten Licht der Mittagssonne. Möglich machen das zwei Eigenschaften des Materials: Zum einen reflektiert es einfallendes Licht fast vollständig, zum anderen strahlt es sehr effizient Wärme ab.

Wissenschaftler um Xiaobo Yin und Ronggui Yang von der University of Colorado in Boulder verwenden dafür den schon länger benutzten Kunststoff Polymethylpenten, der eine sehr niedrige Dichte und eine sehr hohe optische

Transparenz besitzt. Daraus stellen sie eine 0,05 Millimeter dicke Folie her, deren Rückseite sie mit einer hauchdünnen Silberschicht verspiegeln. Das Ergebnis wirft nahezu sämtliches einfallendes Sonnenlicht – rund 96 Prozent – wieder zurück und heizt sich deshalb auch in praller Mittagssonne kaum auf.

Für die Kühlung sorgt aber erst eine weitere Zutat: winzige Kügelchen aus Siliziumdioxid, nur wenige Mikrometer (tausendstel Millimeter) groß, die in den Kunststoff eingebettet werden. Bei diesem Durchmesser zeigen die Kügelchen im Infrarotbereich starke optische Resonanzen. Infolgedessen strahlt die Folie vor allem Infrarotstrahlung mit Wellenlängen um die zehn Mikrometer ab. In diesem Wel-

lenlängenbereich absorbiert Luft kaum, weshalb die Strahlung praktisch ungehindert in die Umgebung entweicht. Da die Energie der Infrarot-Abstrahlung den Gegenständen unter der Folie entzogen wird, kühlen diese mit der Zeit ab.

Unter optimalen Bedingungen verringert die Folie den Berechnungen der Forscher zufolge die Temperatur eines Gegenstands um bis zu zehn Grad, verglichen mit der Umgebungstemperatur. Die Kühlleistung beträgt 92 Watt pro Quadratmeter in direktem Sonnenlicht und über die gesamte Tageslänge gemittelt mehr als 110 Watt pro Quadratmeter. Am effektivsten funktioniert das System kurz nach Sonnenauf- beziehungsweise vor Sonnenuntergang.

Mögliche Anwendungen sehen die Forscher in passiven Klimaanlage, die Häuser im Sommer kühlen. Denkbar ist auch ein Einsatz in Solarzellen: Diese arbeiten oft besser, wenn sie sich weniger stark aufheizen. Den Preis der Folie geben die Forscher im zweistelligen Cent-Bereich pro Quadratmeter an, wobei die Langlebigkeit des Erzeugnisses noch unter Beweis zu stellen sei.

Science 10.1126/science.aai7899, 2017

MATHEMATIK DAS GEHEIMNIS DER RORSCHACH- FORMEN

► Mit zehn Farbkleksen versuchte der Schweizer Psychoanalytiker Hermann Rorschach im Jahr 1921, die seelische Gesundheit seiner Patienten zu ergründen. Der auf den Faltbildern basierende Test entwickelte sich im 20. Jahrhundert zu einem weltbekannten Diagnoseverfahren der Psychologie, dessen Aussagekraft aus heutiger Sicht allerdings umstritten ist. Menschen fühlen sich von den Tintenbildern an etliche verschiedene Objekte erinnert. Bei einigen der Formen sind bis zu 300 verschiedene Deutungen bekannt.

Nun meint eine Gruppe aus Physikern, Mathematikern und Psychologen um Richard P. Taylor von der University of Oregon in Eugene den Grund dafür gefunden zu haben, weshalb manche Klekse ein größeres Assoziationspotenzial bergen als andere. Offenbar ist die Deutung der Formen immer dann

GEOARCHÄOLOGIE MAGNETFELD IM TONKRUG

► Im Lauf des zurückliegenden Jahrhunderts hat die Stärke des Erdmagnetfelds vielerorts um etwa zehn Prozent abgenommen. Manche Forscher sehen darin Vorboten einer Umpolung des Felds, wie es sie in der Erdgeschichte immer wieder gegeben haben soll. Dabei könnte die Schutzwirkung des Magnetfelds gegenüber dem Sonnenwind vorübergehend verschwinden, wodurch Lebewesen an der Erdoberfläche der kosmischen Strahlung intensiver ausgesetzt wären.

Eine neue Untersuchung hilft, die aktuellen Magnetfeldmessungen besser einzuordnen. Israelisch-amerikanische Forscher um Erez Ben-Yosef von der Univer-

Der abgebildete Henkel eines antiken Tonkrugs aus Ramad Rachel in Jerusalem hat ein eingestempeltes Siegel, dessen Inschrift »Zu Senden an den König Hebron« lautet. Das Siegel erlaubt das Alter des Krugs zu bestimmen und damit das frühere Erdmagnetfeld zu rekonstruieren.

sität Tel Aviv haben anhand von 67 Tonkrügen aus dem antiken Jerusalem rekonstruiert, welche Stärke das Erdmagnetfeld in dieser Region zwischen 800 und 200 v. Chr. hatte. Schon damals habe der Wert beträchtlich geschwankt, schreiben die Geoarchäologen. Während des 8. Jahrhunderts v. Chr. habe das Magnetfeld binnen 30 Jahren sogar ganze 27 Prozent seiner Intensität eingebüßt, ohne dass es danach umpolte. Nach wie vor lassen sich solche abrupten Ausschläge aber nicht schlüssig mit geophysikalischen Modellen des Erdinneren erklären.

Ben-Yosef und seine Kollegen nutzten für ihre Studie die Griffe von gebrannten Tonkrügen, auf denen Herrschersiegel eingestempelt sind. Da sich die Siegel den historisch dokumentierten Machthabern zuordnen lassen, können Archäologen recht genau eingrenzen, wann die Krüge hergestellt wurden. Durch Untersuchungen an dem Material ermittelten die Forscher, welche Intensität das Erdmagnetfeld dabei jeweils hatte. Denn wenn der Ton nach dem Brennen auskühlt, prägt sich ihm das Feld ein, indem es ihn magnetisiert.

Proc. Natl. Acad. Sci. 10.1073/pnas.1615797114, 2017



GIDEO UPSCHITS, TEL AVIV UNIVERSITY

besonders ergiebig, wenn ihr Rand einen eher geringen Grad an Komplexität aufweist.

Die Tintenklexe lassen sich mit so genannten Fraktalen beschreiben. Darunter verstehen Mathematiker unregelmäßige Muster, die sich wiederholen, wenn man die Oberfläche eines Objekts vergrößert. Fraktale Strukturen kommen auch in der Natur vor, zum Beispiel bei Schneeflocken und Wolken. Bereits 1990 stellten Wissenschaftler die Vermutung auf, dass Naturformen vor allem dann die Fantasie anregen, wenn ihre fraktalen Merkmale nur schwach ausgeprägt sind.

Das gilt laut der Forschungsarbeit von Taylor und seinen Kollegen auch für Rorschach-Bilder. Das Team entwickelte eine Kennzahl, die Werte zwischen 1,0 und 2,0 annehmen kann und als Maß für die fraktale Komplexität am Rand der zehn historischen Figuren diente. Liegt die Zahl bei 1,0, ist der Rand einer Form glatt wie eine Linie. Nähert sie sich 2,0, ist die Umrandung einer Figur stark zerklüftet.

Die Forscher verglichen die von einem Computeralgorithmus berechneten Kennzahlen mit Aufzeichnungen von Psychologen aus den 1930er und 1950er Jahren. Diese hatten festgehalten, mit wie vielen Objekten die jeweiligen Rorschach-Faltbilder von Patienten in Verbindung gebracht wurden. Dabei stieß Taylors Team auf eine deutliche Korrelation: Je niedriger die Kennzahl eines Klexes, desto mehr Deutungen hatte er hervorgerufen. Das bestätigte

sich bei einem Test in der Gegenwart. Die Wissenschaftler ließen einen Algorithmus verschiedene Rorschach-Formen erstellen und zeigten sie anschließend 23 amerikanischen Psychologiestudenten. Auch diese fühlten sich an umso mehr Objekte erinnert, je geringer die fraktale Komplexität des Randes einer Figur war. Dabei zeigte sich allerdings, dass ein geringes Maß an Zerklüftung nötig zu sein scheint, um die Fantasie anzuregen: Eine Figur mit komplett glattem Rand löst den Wissenschaftlern zufolge kaum Assoziationen aus.

PLoS One 10.1371/journal.pone.0171289, 2017

PHYSIK STREUUNG VON LICHT AN LICHT

► Wenn sich zwei Lichtstrahlen kreuzen, sollten sie eigentlich unbehelligt voneinander fortschreiten. Das besagen die berühmten Maxwell-Gleichungen aus dem 19. Jahrhundert,

mit der die klassische Physik elektromagnetische Strahlung beschreibt. Sobald Forscher aber die Gesetze der Quantenphysik berücksichtigen, ändert sich die Situation. Dann können die Lichtteilchen, Photonen genannt, sehr wohl Einfluss aufeinander nehmen, wie die Physiker Werner Heisenberg und Hans Euler bereits 1935 in einem Aufsatz vermutet haben.

Physikern am Kernforschungszentrum CERN in Genf ist es nun gelungen, diese Vorhersage experimentell zu bestätigen. Mit dem Large Hadron Collider (LHC) schossen sie im Jahr 2015 annähernd lichtschnelle Bleiatomkerne aufeinander und beobachteten mit dem ATLAS-Detektor, wie deren Kollisionen abliefen. In seltenen Fällen kam es dabei vor, dass die Atomrümpfe nicht zerplatzten, sondern lediglich dicht aneinander vorbeirasteten. War der Abstand zwischen beiden Partikeln größer als der Durchmesser eines Atomkerns, spielten die sonst dominanten

Kernkräfte keine Rolle im Geschehen.

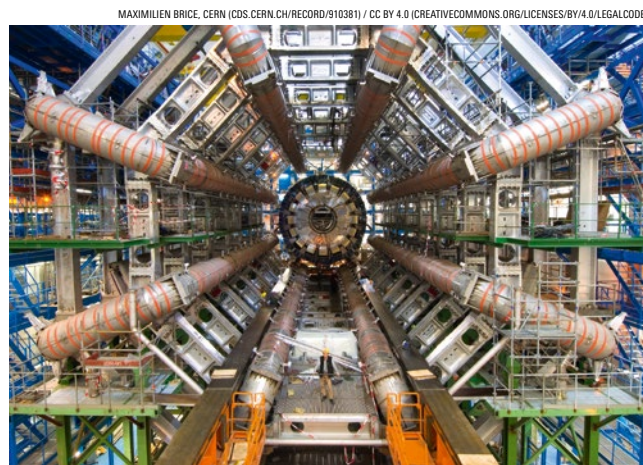
Stattdessen bildete sich dann zwischen den Bleikernen für kurze Zeit ein enorm starkes elektrisches Feld. Dieses kann man als Strahl von Photonen beschreiben, die manchmal miteinander wechselwirken. In solchen Fällen werden zwei der Lichtteilchen in unterschiedliche Richtungen abgelenkt und tauchen als klare Signatur im Detektor auf. In ihrem riesigen Datensatz entdeckten die Physiker insgesamt 13 dieser Ereignisse. Das ist ein starkes Indiz dafür, dass der von Heisenberg vorhergesagte quantenphysikalische Effekt tatsächlich existiert.

arXiv, 1702.01625, 2017

PALÄONTOLOGIE SCHNELLE ERHOLUNG NACH MASSENSTERBEN

► Vor knapp 252 Millionen Jahren vernichtete das größte Massenaussterben der Erdgeschichte rund 95 Prozent der damaligen Meereslebewesen. Viele Wissenschaftler nahmen bisher an, dass Flora und Fauna etwa zehn Millionen Jahre brauchten, um sich von dieser Katastrophe an der Perm-Trias-Grenze zu erholen. Neue Fossilienfunde aus der Umgebung des amerikanischen Bear Lake (Idaho, USA) belegen nun allerdings, dass das Leben viel schneller wieder aufblühte.

Die mehr als 750 Fossilien aus der Triaszeit datieren auf ein ungefähres Alter von 250,6 Millionen Jahren – nur knapp 1,3 Mil-



Der Nachweis der Licht-an-Licht-Streuung ist mit dem ATLAS-Detektor des LHC geglückt. Mit dem haushohen Gerät untersuchen Physiker, was bei der Kollision von Atomkernen passiert.

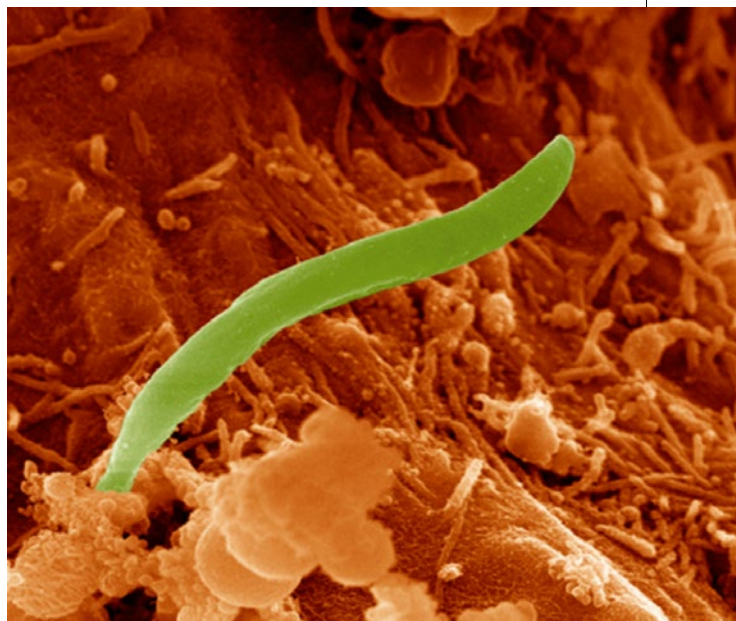
MEDIZIN LEBENDE MALARIAPARASITEN ALS IMPfstoff

► Eine experimentelle Malariaimpfung hat sich im ersten klinischen Test als zu 100 Prozent erfolgreich erwiesen. Entwickelt wurde sie von der Biotechfirma Sanaria, die ihr Konzept zusammen mit Forschern der Universität Tübingen prüfte. Bei dem Verfahren injizieren die Wissenschaftler infektiöse Malariaerreger (Plasmodien) direkt in den Blutkreislauf von Probanden. Gleichzeitig behandeln sie die Testpersonen mit einem Antimalariamittel. So verhindern sie eine Erkrankung und konditionieren das Immunsystem der Behandelten darauf, den Erreger zu erkennen und bei künftigen Infektionen zu bekämpfen.

Neun gesunden Freiwilligen, die noch nie zuvor an Malaria gelitten hatten, verabreichten die Wissenschaftler dreimal innerhalb von zwei Monaten hohe Dosen an lebenden Plasmodien. Im gleichen Zeitraum bekamen die Probanden wöchentlich das Medikament Chloroquin. Rund zwei Monate nach der letzten Chloroqingabe spritzten die Forscher ihnen erneut Malaria Parasiten. Bei keinem der Geimpften brach die Krankheit aus, während sich alle 13 Teilnehmer in der ungeimpften Kontrollgruppe infizierten (sie wurden nach dem Nachweis der Parasiten im Blut mit Chloroquin behandelt). Die Impfung war laut den Forschern gut verträglich und löste keine ernsthaften Nebenwirkungen aus.

Malaria ist vor allem in Afrika ein enormes Gesundheitsproblem. Auf dem Kontinent leben schätzungsweise 200 Millionen Erkrankte, von denen jährlich mehr als 500 000 den Symptomen erliegen. Wirksame und vor allem günstige Impfungen sind daher dringend erforderlich.

Die neue Methode ist effektiver als eine andere experimentelle Malariaimpfung, die 2015 in einem groß angelegten Test nur etwa 50 Prozent der Behandelten



Plasmodium-Sporozoit (Rasterelektronenmikroskopaufnahme, grün eingefärbt) werden von Mücken auf Menschen übertragen. Sie dringen in Leberzellen ein, reifen dort und befallen anschließend rote Blutkörperchen.

schützte. Einer 2014 getesteten Impfstrategie von Sanaria mit lebenden, aber nicht infektiösen Parasiten ist sie ebenfalls überlegen, weil sie weniger Plasmodien zum Auslösen einer Immunreaktion benötigt. Doch bei dem neuen Verfahren muss man die Erreger zunächst aufwändig aus den Speicheldrüsen infizierter Moskitos isolieren. Das ist teuer, und daher steht die Frage im Raum, ob sich die Impfung überhaupt kostengünstig und flächendeckend in Malariagebieten einsetzen lässt. Auch ob der Impfschutz dauerhaft anhält, müssen die Mediziner noch zeigen.

Nature 10.1038/nature21060, 2017

lionen Jahre nach dem Perm-Trias-Aussterben. Das deutet auf eine wesentlich raschere Erholung des Ökosystems hin, als sie bisher postuliert worden war. Forscher um Arnaud Brayard von der Université Bourgogne Franche-Comté (Frankreich) zeigten sich überrascht von dem Artenreichtum, der sich in den

versteinerten Lebewesen offenbart. Unter den Fundstücken sind Gliederfüßer wie urzeitliche Hummer und andere Krebstiere, ausgestorbene Schwammtiere und eine Gruppe von Tintenfischen, die man bislang nur aus späteren Abschnitten der Erdgeschichte kannte. Auch Überreste von räuberisch

lebenden Belemniten (heute ausgestorbene Kopffüßer) sowie von Knochen- und Knorpelfischen aus jenem Zeitraum kamen zu Tage.

Wie es zu dem katastrophalen Massenaussterben am Ende des Perms kam, ist bis heute rätselhaft. Gut dokumentiert sind jedoch dessen unmittelbare Folgen. So erwärmten sich die

Weltmeere um mindestens acht Grad Celsius und versauerten infolge einer dramatisch ansteigenden atmosphärischen Kohlenstoffdioxidkonzentration. Das Aussterbeereignis am Ende des Perms kam, ist bis heute rätselhaft. Gut dokumentiert sind jedoch dessen unmittelbare Folgen. So erwärmten sich die

Sci. Adv. 3, e1602159, 2017

KOSMOLOGIE

DIE GROSSE LEERE

Ein merkwürdiger kalter Fleck auf der Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung deutet auf eine gewaltige Region im Universum hin, die nahezu keine Materie enthält.



István Szapudi ist Astronom am Institute for Astronomy der University of Hawaii. Dort erforscht er die großräumige Struktur des Universums.

► [spektrum.de/artikel/1432746](https://www.spektrum.de/artikel/1432746)

Die älteste Strahlung des Universums stammt aus einer Epoche 380 000 Jahre nach dem Urknall, der vor 13,8 Milliarden Jahren stattgefunden hat. Sie erreicht uns gleichmäßig aus allen Richtungen mit einer mittleren Temperatur von 2,7 Kelvin. Die zweidimensionale Himmelskarte dieser kosmischen Hintergrundstrahlung bezeichnen Forscher oft als Babyfoto des Universums, weil sie einen Einblick in jene frühen Bedingungen bietet, die den heutigen Kosmos geformt haben.

Doch das Abbild des jungen Universums ist keineswegs makellos. Es weist so genannte Anomalien auf, die sich nicht mit dem kosmologischen Standardmodell in

Einklang bringen lassen. Die größte Unregelmäßigkeit entdeckte die Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA im Jahr 2004. Sie nimmt etwa die 20-fache Fläche des Vollmonds am Himmel ein. Die aus dieser Region kommenden Photonen erscheinen besonders kühl. Für einige Forscher ist jener »kalte Fleck« ein Makel, der die majestätische Symmetrie der Hintergrundstrahlung bricht, für andere bereichert er in aufregender Weise die Eigenschaften des Kosmos. Mich haben die Anomalie und die Fragen nach den ihr zu Grunde liegenden Ursachen von Anfang an fasziniert.

Das Rätsel um den kalten Fleck wird unter den Wissenschaftlern heiß diskutiert. Vielleicht handelt es sich bei ihm nur um eine rein zufällige Erscheinung. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist mit etwa 1:200 jedoch gering. Es kursieren jedoch auch zahlreiche andere Erklärungsversuche: von Problemen mit den Beobachtungsinstrumenten bis hin zur Idee, es handele sich um ein Portal zu einem anderen Universum oder zu versteckten Dimensionen.

Ausgehend von einer Extrapolation der bekannten Strukturen im Weltall kamen einige Kollegen und ich 2007 auf die Idee, dieser kalte Fleck könne von einer gewaltigen, aber ungewöhnlich massearmen Region zeugen, in der es kaum Materie gibt. Sollte eine solche große Leere tatsächlich existieren und den kalten Fleck gemäß unseren Vorstellungen verursachen, hätte das enorme Konsequenzen: Sie wäre unter anderem ein unabhängiges Indiz für die Dunkle Energie, die ihrerseits als Ursache für die beschleunigte Expansion des Universums gilt.

Tatsächlich sind Regionen mittlerer Größe, die relativ wenige Galaxien enthalten, keineswegs selten – ebenso wie ihre Gegenstücke, die bis zu mehrere tausend Mitglieder

AUF EINEN BLICK KOSMISCHES KÄLTELOCH

- 1 Die Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung weist einen seltsamen »kalten Fleck« auf – dort sind die Photonen deutlich kühler als im Durchschnitt.
- 2 Grund dafür könnte eine gigantische, nahezu leere Region im Vordergrund sein. Durchquert Licht eine solche »Supervoid«, so verliert es durch den »integrierten Sachs-Wolfe-Effekt« Energie und wird kühler.
- 3 Tatsächlich haben Astronomen unlängst eine 1,8 Milliarden Lichtjahre große Supervoid in Richtung des kalten Flecks entdeckt. Es sind allerdings noch weitere Daten nötig, um einen Zusammenhang zu beweisen.



Eine weiträumige Region, in der nahezu keine Galaxie oder sonstige Materie vorhanden ist, könnte den kalten Fleck in der Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung erklären (künstlerische Darstellung).



Bei einer Himmelsdurchmusterung mit dem Pan-STARRS-Teleskop – dem Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System – auf der Hawaii-Insel Maui spürten Astronomen eine gewaltige Region auf, in der kaum Materie vorhanden ist.

umfassenden Galaxienhaufen. Vermutlich führten im jungen Universum zufällige quantenmechanische Prozesse zu kleinen Dichteschwankungen in der ursprünglichen Materie und legten damals die Keime zur Entstehung von Galaxienhaufen und Voids (Englisch für: Leere). Auf Grund ihrer größeren Anziehungskraft sammelten die ursprünglich bereits dichteren Regionen mit der Zeit mehr und mehr Materie an. Im Gegenzug verringerte sich die Dichte in den dazwischenliegenden Regionen immer weiter.

Berg- und Talfahrt für die Hintergrundstrahlung: Das kostet Energie

Für solche kleineren Voids und Galaxiencluster hatten sich die Forscher bereits überlegt, welche Auswirkungen sie auf Materie oder Licht beim Durchqueren haben würden. Bewegt sich ein Teilchen in eine massearme Region hinein, wird es von der dichteren Materie außerhalb stärker angezogen als von der extrem dünn verteilten innerhalb. Dadurch verliert es an Energie, wie ein Ball, der einen Hügel hinaufrollt. Beim Verlassen der Void kehrt sich der Effekt um: Die davor liegende, dichtere Materie übt eine stärkere Anziehungskraft aus, und das Teilchen beschleunigt wie ein Ball, der einen Hügel hinabrollt. Ähnlich ergeht es den Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung. Sie ändern zwar nicht ihre Geschwindigkeit, denn die

Lichtgeschwindigkeit ist im Vakuum eine Konstante, dafür aber ihre Energie. Diese wiederum verhält sich proportional zur Temperatur. Bewegt sich ein Photon in eine Void hinein, so verliert es Energie, es wird kühler. Verlässt es die Void wieder, so gewinnt es Energie zurück und wird erneut wärmer. Es sollte daher aus dem Leerraum mit derselben Energie herauskommen, mit der es hineingeflogen ist. Es sei denn, das Universum expandiert.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten haben Astronomen entdeckt, dass der Kosmos sich nicht nur ausdehnt, sondern sich seine Expansion auch noch beschleunigt. Als Ursache dafür vermuten die meisten von ihnen eine Dunkle Energie. Sie ist eine Art negativer Druck des leeren Raumes, welcher der Schwerkraft entgegenwirkt. Für sich allein genommen würde die Gravitation die Expansion sogar ausbremsen.

Die beschleunigte Expansion wirkt sich auf das Verhalten von Materie und Licht beim Durchqueren einer Void aus. Aus der Perspektive des Photons hebt sich gewissermaßen der Grund am Fuß des Hügels an, während es die Void durchquert. Deshalb gewinnt es beim Verlassen des leeren Bereichs weniger Energie, als es beim Hineinfliegen abgegeben hat. Netto verliert ein Photon beim Durchqueren also Energie. Deshalb sollten wir in der Umgebung von Regionen geringer Materiedichte eine leicht verminderte Temperatur der Hintergrundstrahlung feststellen. Dieses

Phänomen nennen die Kosmologen integrierten Sachs-Wolfe-Effekt (ISW-Effekt). Umgekehrt gilt für das Durchqueren von Superhaufen. Hierbei gewinnen Photonen netto Energie, die Temperatur der Hintergrundstrahlung ist dann ein klein wenig höher.

Die Suche nach einer Supervoid anhand von Himmelsdurchmusterungen ist nicht trivial

Der ISW-Effekt sollte aber winzig sein: Selbst für große Voids führt er zu Temperaturänderungen, die unter den mittleren Schwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung liegen. Letztere können bis zu 0,01 Prozent betragen und haben ihre Ursache in geringen Dichteabweichungen im jungen Universum. Doch bei einer entsprechend großen Leere – einer »Supervoid« – könnte die Differenz ausreichen, um den beobachteten kalten Fleck zu erzeugen. Und wenn wir zeigen könnten, dass eine solche riesige Leere tatsächlich existiert und für die Anomalie verantwortlich ist, dann hätten wir nicht nur eine Erklärung für den kalten Fleck gefunden. Wir würden zugleich einen unabhängigen Beweis für die Existenz der Dunklen Energie liefern. Denn den ISW-Effekt gäbe es zwar auch, wenn das Universum nicht beschleunigt expandieren würde. Dann wäre der Effekt so gering, dass er sich nicht nachweisen ließe.

Im Jahr 2007 begannen die Astronomen, nach einer Supervoid in der Himmelsregion des kalten Flecks zu suchen. Eine solche Struktur nachzuweisen, ist jedoch nicht einfach. Denn die meisten Himmelsdurchmusterungen produzieren zweidimensionale Bilder des Universums. Aus ihnen geht nicht hervor, wie weit die erfassten Objekte von uns entfernt sind. So können scheinbar benach-

barte Galaxien tatsächlich nah beieinanderliegen oder aber sich weit voneinander entfernt entlang unserer Sichtlinie befinden.

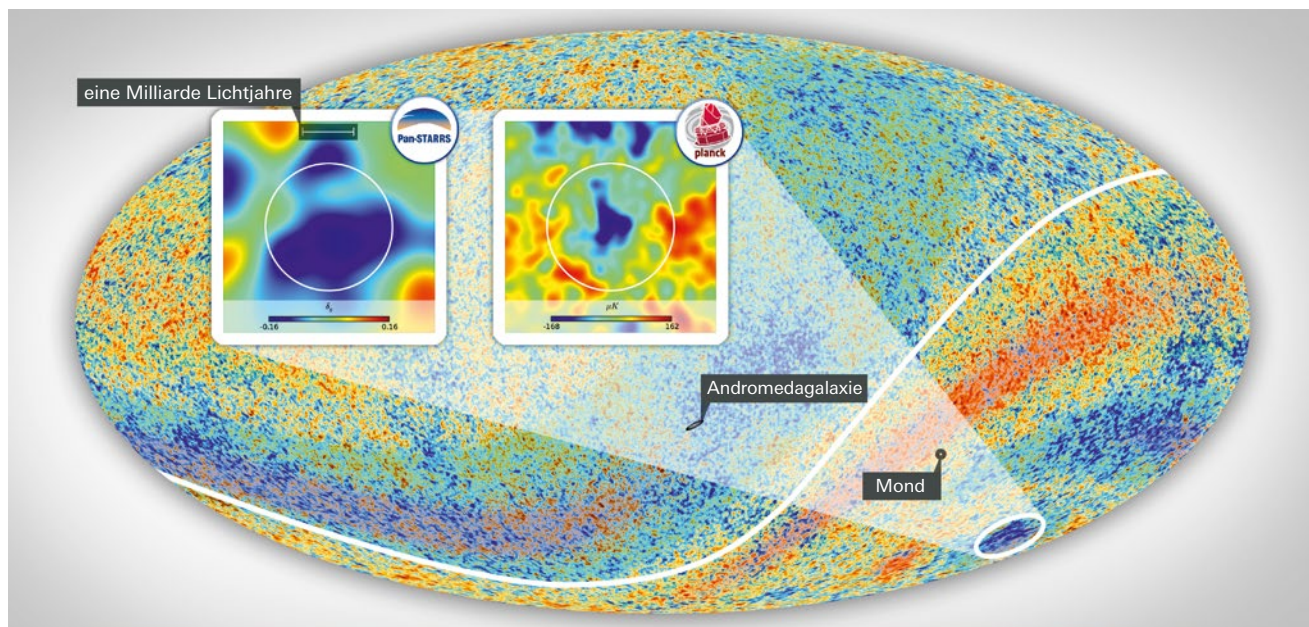
2007 analysierten Lawrence Rudnick von der University of Minnesota in Minneapolis und seine Kollegen den auf Radiobeobachtungen basierenden Galaxienkatalog des NRAO VLA Sky Survey (NVSS). Dabei stießen sie auf eine Region in Richtung des kalten Flecks, in der weniger Galaxien vorkommen als anderswo im Mittel. Zwar enthält auch dieser Katalog keine Informationen über deren Entfernungen. Doch die Astronomen wussten, dass die

Die Supervoid könnte den kalten Fleck erklären. Vielleicht enthält sie aber auch überraschende Wahrheiten über die Gravitation

meisten dort aufgeführten Galaxien sehr weit von uns entfernt sind.

Auf Grundlage dieser Daten nahmen Rudnick und seine Kollegen an, dass eine heute elf Milliarden Lichtjahre entfernte Supervoid den kalten Fleck durch den ISW-Effekt erzeugt. Wegen der Expansion des Universums hätte die Strahlung, die uns heute von dort erreicht, die Supervoid bereits vor acht Milliarden Jahren durchquert. In dieser frühen kosmischen Ära war die Dunkle Energie aber noch nicht so stark wie heute und deshalb der ISW-Effekt zu schwach, um den beobachteten kalten Fleck zu erzeugen.

Diese Himmelskarte der kosmischen Hintergrundstrahlung weist Temperaturschwankungen von 0,0002 Kelvin auf. Rot sind wärmere Gebiete, blaue sind kühler. Diese kleinräumigen Fluktuationen lassen sich mit dem kosmologischen Standardmodell erklären – nicht jedoch jener auffällige kalte Fleck im rechten unteren Kartenbereich. Er ist merklich größer als die üblichen Schwankungen.



Dennoch weckten Rudnicks Arbeiten mein Interesse. Gemeinsam mit dem damaligen Doktoranden Ben Granett und dem Postdoc Mark Neyrinck von der University of Hawaii untersuchten wir, wie häufig kleinflächigere Strukturen der kosmischen Hintergrundstrahlung – also kühlere oder wärmere Regionen – mit Voids und kleineren Galaxienhaufen im Vordergrund überlappen. Tatsächlich kamen solche Übereinstimmungen häufig vor. Obwohl keine der bekannten Strukturen den kalten Fleck verursachen konnte, überzeugte uns dieses Ergebnis doch davon, dass die Suche nach einer Supervoid in dessen Richtung durchaus ihre Berechtigung hatte.

So beobachteten wir Anfang 2010 mit dem Canada-France-Hawaii-Telescope mehrere ausgewählte Ausschnitte in der Region des kalten Flecks und zählten dort Galaxien. Das Ergebnis war ernüchternd: Wir fanden keinerlei Anzeichen für eine große Leere in der von Rudnick angegebenen Entfernung und konnten sogar die Existenz einer Supervoid in einem Abstand von mehr als drei Milliarden Lichtjahren komplett ausschließen. Eine ähnliche Suche von Malcolm Bremer von der University of Bristol in Großbritannien und seinen Mitarbeitern ergab nichts anderes. Parallel zu unseren Beobachtungen überprüften unabhängige Forscher noch einmal die statistische Signifikanz von Rudnicks Ergebnissen und erhielten einen niedrigeren Wert als er selbst. Es sah also zunächst so aus, als müssten wir die Idee aufgeben, dass der kalte Fleck durch den ISW-Effekt entstehen könnte.

Warum in die Ferne schweifen?

Das Ziel ist deutlich näher als gedacht!

Doch es gab einen Hoffnungsschimmer. In unseren Daten zeichnete sich eine Supervoid ab, die wesentlich näher bei uns liegt. Eine solche Struktur in der Nähe nachzuweisen, war anhand unserer Daten aber schwieriger als eine weit entfernte. Denn einem beobachteten Himmelsausschnitt entspricht in großer Entfernung ein viel größeres räumliches Volumen als in unserer Nähe. Entsprechend steigt die Genauigkeit unserer Galaxienzählungen mit der Entfernung. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die von uns gefundenen geringeren Galaxienzahlen bei kleinen Entfernungen tatsächlich auf eine Supervoid in unserer kosmischen Nachbarschaft deuteten, betrug lediglich 75 Prozent. Gemessen an den üblichen wissenschaftlichen Standards ist das kaum mehr als ein Fünkchen Hoffnung. Wir mussten also eine weit größere Himmelsregion untersuchen, die den kalten Fleck komplett erfasst, um zuverlässige Aussagen treffen zu können.

Wenige Jahre später erhielt das Institute for Astronomy der University of Hawaii, an dem ich forsche, ein neues Teleskop: das erste Instrument des »Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System«, kurz Pan-STARRS PS1. Es war mit der größten Kamera der Welt mit 1,4 Gigapixeln ausgestattet und in einer Höhe von 3000 Metern auf dem Vulkan Haleakala der Insel Maui stationiert. Genau das, was ich für umfassendere Studien brauchte.

Ein kalter, einsamer Energiehügel im Weltall

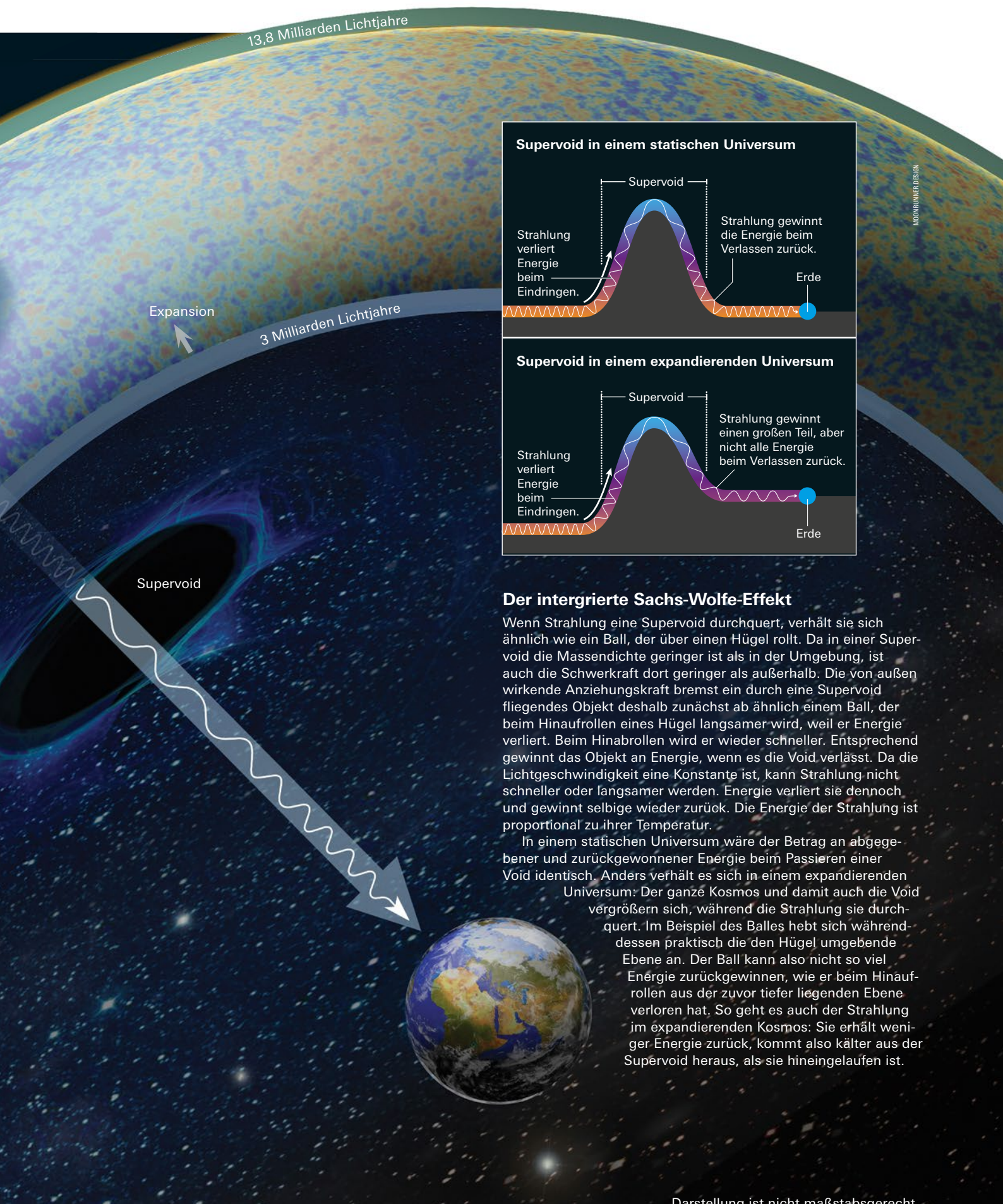
MODERNER DESIGN

Expansion

kalter Fleck
in der kosmischen
Hintergrundstrahlung

Der kalte Fleck

Die kosmische Hintergrundstrahlung wurde 380 000 Jahre nach dem Urknall ausgesandt. Sie erreicht uns heute mit einer Temperatur von 2,7 Kelvin. Ihre Karte weist geringfügige Temperaturschwankungen auf. In roten Bereichen ist die Strahlung etwas wärmer, in blauen etwas kühler. Doch eine bestimmte Region ist größer und kühler und hebt sich deutlich von den üblichen Fluktuationen ab. Forscher haben just dort eine riesige Supervoid entdeckt – eine Region im All, in der es deutlich weniger Galaxien gibt als anderswo üblich. Diese große Leere könnte nach Ansicht von István Szapudi den mysteriösen kalten Fleck erklären, den der NASA-Satellit WMAP in der kosmischen Hintergrundstrahlung entdeckte und der Planck-Satellit der ESA bestätigte.

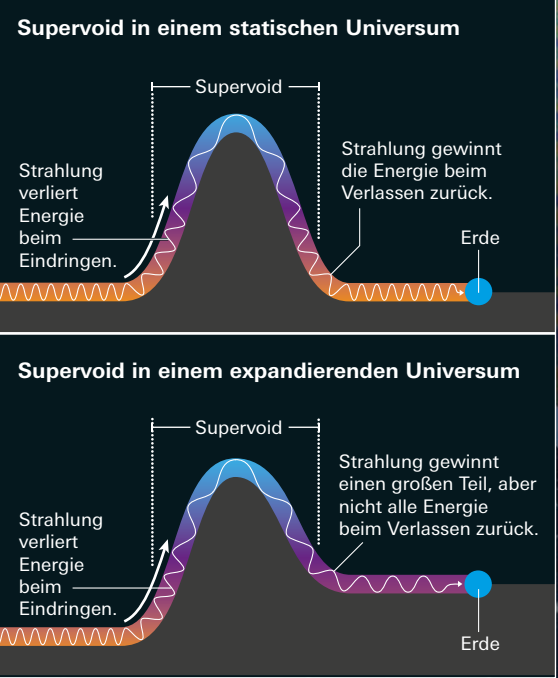


13,8 Milliarden Lichtjahre

Expansion

3 Milliarden Lichtjahre

Supervoid



MOONHUNTER DESIGN

Der integrierte Sachs-Wolfe-Effekt

Wenn Strahlung eine Supervoid durchquert, verhält sie sich ähnlich wie ein Ball, der über einen Hügel rollt. Da in einer Supervoid die Massendichte geringer ist als in der Umgebung, ist auch die Schwerkraft dort geringer als außerhalb. Die von außen wirkende Anziehungskraft bremst ein durch eine Supervoid fliegendes Objekt deshalb zunächst ab ähnlich einem Ball, der beim Hinaufrollen eines Hügel langsamer wird, weil er Energie verliert. Beim Hinabrollen wird er wieder schneller. Entsprechend gewinnt das Objekt an Energie, wenn es die Void verlässt. Da die Lichtgeschwindigkeit eine Konstante ist, kann Strahlung nicht schneller oder langsamer werden. Energie verliert sie dennoch, und gewinnt selbige wieder zurück. Die Energie der Strahlung ist proportional zu ihrer Temperatur.

In einem statischen Universum wäre der Betrag an abgegebener und zurückgewonnener Energie beim Passieren einer Void identisch. Anders verhält es sich in einem expandierenden Universum: Der ganze Kosmos und damit auch die Void vergrößern sich, während die Strahlung sie durchquert. Im Beispiel des Balles hebt sich währenddessen praktisch die den Hügel umgebende Ebene an. Der Ball kann also nicht so viel Energie zurückgewinnen, wie er beim Hinaufrollen aus der zuvor tiefer liegenden Ebene verloren hat. So geht es auch der Strahlung im expandierenden Kosmos: Sie erhält weniger Energie zurück, kommt also kälter aus der Supervoid heraus, als sie hineingelaufen ist.

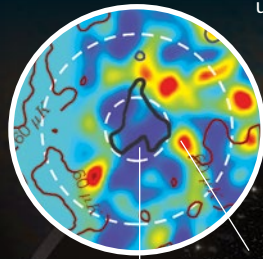
Darstellung ist nicht maßstabsgerecht.

Die Suche nach der Supervoid

Um die große Leere aufzuspüren, die den kalten Fleck in der Karte der Hintergrundstrahlung verursachen könnte, haben Astronomen einen Galaxienkatalog mit Daten des Widefield Infrared Survey Explorer (WISE) und des PanSTARRS-Teleskops ausgewertet. Er enthält die Himmelspositionen vieler Galaxien, nicht aber deren Entfernungen. Letztere lassen sich jedoch aus den Farben der Galaxien abschätzen. Denn ihr Licht verliert auf seiner Reise durchs All wegen der kosmischen Expansion Energie, seine Wellenlänge wird gedehnt, und es erscheint damit rötlicher. Diese kosmologische Rotverschiebung ist umso stärker, je weiter ein Objekt von uns entfernt ist.

Das Universum in Scheiben

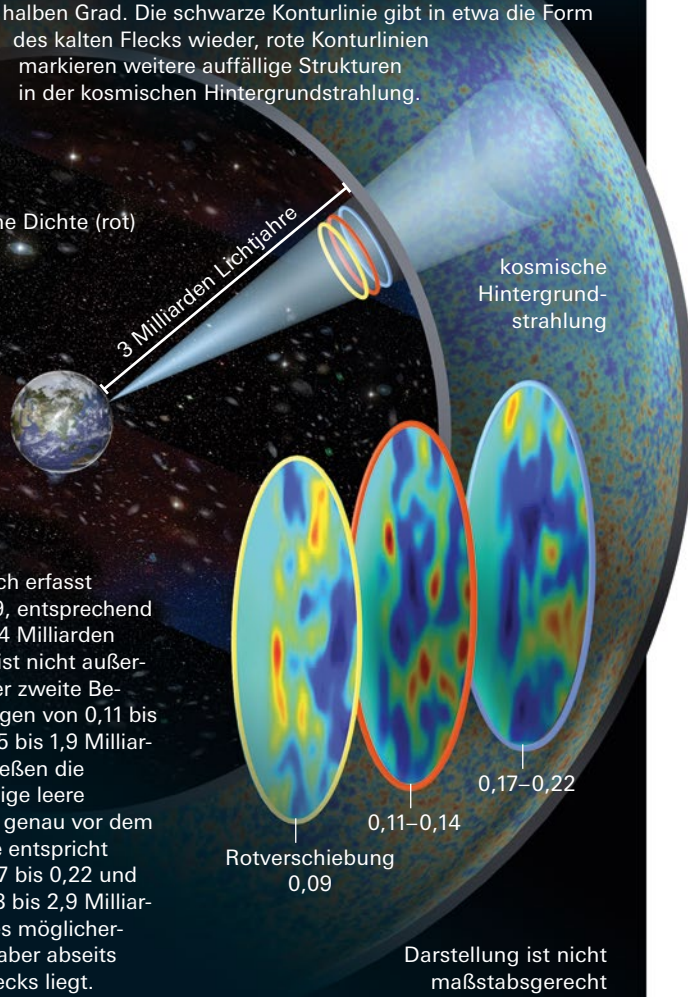
Auf Grundlage der Galaxienpositionen und geschätzten Entfernungen haben die Forscher eine in drei Entfernungsbereiche gestaffelte dreidimensionale Dichtekarte erstellt. Sie ist außerdem auf die Position des kalten Flecks zentriert. Die Galaxiendichte (links) ist farbig kodiert: Rot entspricht einer hohen, blau einer niedrigen Dichte. Die weißen Kreise markieren Radien von fünf und zehn Grad um das Zentrum des kalten Flecks. Zum Vergleich: Der Mond hat am Himmel einen Durchmesser von einem halben Grad. Die schwarze Konturlinie gibt in etwa die Form des kalten Flecks wieder, rote Konturlinien markieren weitere auffällige Strukturen in der kosmischen Hintergrundstrahlung.



hohe Dichte (rot)
geringe Dichte (blau)

Fündig geworden

Der erste Entfernungsbereich erfasst Rotverschiebungen bis 0,09, entsprechend einer Distanz von bis zu 1,24 Milliarden Lichtjahren. Diese Gegend ist nicht außergewöhnlich materiearm. Der zweite Bereich deckt Rotverschiebungen von 0,11 bis 0,14 oder die Region von 1,5 bis 1,9 Milliarden Lichtjahren ab. Dort stießen die Forscher auf eine weiträumige leere Region oder Supervoid, die genau vor dem kalten Fleck liegt. Der dritte entspricht Rotverschiebungen von 0,17 bis 0,22 und damit Entfernungen von 2,3 bis 2,9 Milliarden Lichtjahren. Dort gibt es möglicherweise eine kleine Void, die aber abseits vom Zentrum des kalten Flecks liegt.



3 Milliarden Lichtjahre
kosmische Hintergrundstrahlung
Rotverschiebung 0,09
0,11-0,14
0,17-0,22

Darstellung ist nicht maßstabsgerecht

MODRINNER DESIGN; ENKLINER NACH: SZAPUDI, I. ET AL., DETECTION OF A SUPERVOID ALIGNED WITH THE COLD SPOT OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND, IN: MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY 450, S. 288-294, 2015

Im Mai 2010 begannen meine Kollegen und ich, im Rahmen eines gemeinsamen Projekts zusammen mit mehreren anderen Universitäten drei Viertel des gesamten Himmels zu kartieren. Zwar ließ sich der wissenschaftliche Projektleiter von Pan-STARRS, Nick Kaiser, nicht davon überzeugen, als Erstes den kalten Fleck abzuscannen. Immerhin lag diese Region aber in jenem Bereich, den das Teleskop in den ersten Betriebsjahren beobachten sollte.

Während wir sehnlichst auf diese Daten warteten, begann ich eine Zusammenarbeit mit dem damaligen Studenten András Kovács in Budapest. Wir nutzten die öffentlich verfügbaren Daten der Satellitenobservatorien WMAP und Planck sowie neu veröffentlichte Galaxiendaten des

Wide-field Infrared Survey Explorers (WISE) der NASA, um den ISW-Effekt zu studieren und, wenn möglich, nach der Supervoid zu suchen.

Kovács sollte die größten Regionen geringer Dichte im WISE-Galaxienkatalog aufspüren. Schon nach einigen Tagen schickte er mir eine E-Mail mit Bildern und Koordinaten der größten Voids im WISE-Katalog. Eine davon lag in der gleichen Himmelsregion wie der kalte Fleck! Ich hatte Kovács noch nichts von meinem Interesse an einem Zusammenhang zwischen einer Supervoid und dem kalten Fleck erzählt, um seine Auswertung nicht durch die Hoffnung auf ein gewünschtes Resultat zu beeinflussen. Deshalb war sein Ergebnis für mich umso aufregender. Da

der WISE-Katalog Galaxien enthält, die uns näher sind als jene im NVSS, war dies bereits der zweite Hinweis auf eine Supervoid in unserer kosmischen Nachbarschaft.

Von da an arbeiteten wir jahrelang daran, aus diesen ersten Hinweisen handfeste Beweise zu machen. Wir kombinierten die Galaxiendaten von WISE, Pan-STARRS und dem Two Micron All Sky Survey. Doch irgendwie mussten wir den Galaxien Entfernungen zuordnen. Ein Weg bietet sich über die Expansion des Universums an. Eine Galaxie bewegt sich scheinbar umso schneller von uns weg, je weiter sie von uns entfernt ist. Mit dem Hubble-Gesetz lässt sich aus der gemessenen Rotverschiebung eines Objekts seine Entfernung ermitteln. Zwar besaßen wir keine direkten Messungen der Rotverschiebungen unserer Galaxien, doch wir schätzten sie aus deren Farben ab. Dazu verglichen wir die beobachteten Helligkeiten in verschiedenen Frequenzbereichen mit den von uns angenommenen Grundhelligkeiten dieser Galaxien ohne Rotverschiebung.

So ordneten wir schließlich jeder Galaxie in der Himmelsregion um den kalten Fleck eine Entfernung zu. Darauf basierend erstellten wir eine Reihe tomografischer Schnitte, um die räumliche Materieverteilung darzustellen. Dabei offenbarte sich in unserer unmittelbaren kosmischen Nachbarschaft eine fast sphärische Supervoid – ein riesiger Bereich fast ohne Galaxien. Ihre vergleichsweise geringe Entfernung von rund drei Milliarden Lichtjahren hatte es so schwer gemacht, sie aufzuspüren.

Supervoid gefunden – Rätsel aber noch nicht endgültig gelöst

Während der folgenden Monate überprüften wir die statistische Aussagekraft unserer Daten. Die Existenz der Supervoid erwies sich als überwältigend signifikant. Mit einem Durchmesser von 1,8 Milliarden Lichtjahren ist diese Region außerdem ausgesprochen groß. Möglicherweise handelt es sich dabei um die größte jemals entdeckte Struktur im Kosmos. Und sie ist vermutlich ein seltenes Objekt. Kosmologische Theorien sagen die Existenz von lediglich einigen wenigen derartigen Leerräumen im beobachtbaren Universum voraus.

Wir hatten also unsere Supervoid gefunden, und das Rätsel schien zunächst gelöst. Allerdings ist ihre Anwesenheit genau vor dem kalten Fleck allein noch kein ausreichender Beweis für einen ursächlichen Zusammenhang zwischen beiden. Sie könnten sich auch rein zufällig an derselben Stelle am Himmel befinden. Es stellte sich aber heraus, dass es mindestens 20 000-mal wahrscheinlicher ist, dass die Supervoid den kalten Fleck produziert, als dass es sich hier um eine zufällige Koinzidenz handelt.

Um die beobachtete Abweichung des kalten Flecks von der mittleren Temperatur der Hintergrundstrahlung zu erklären, müsste die Supervoid jedoch noch zwei- bis viermal größer sein. Daher gehen manche Kollegen doch eher von einer zufällig übereinstimmenden Lage beider Objekte aus oder schlagen vor, nach anderen Erklärungen zu suchen. Vielleicht strahlen die Galaxien in dieser Region weniger Energie ab, als wir erwarten. Das könnte in gewisser Weise den ISW-Effekt vortäuschen.

Und auch wenn die Supervoid in unseren Beobachtungen deutlich hervortritt, können wir ihre Größe, Form und Position noch nicht allzu sicher angeben. Entsprechend bleibt ihr Einfluss auf die Hintergrundstrahlung vorerst schwer zu berechnen. Wenn die Void beispielsweise in Sichtrichtung stärker auseinandergezogen wäre, als wir es derzeit annehmen, oder es sich um mehrere, hintereinanderliegende leere Bereiche handelte, könnte sie den kalten Fleck besser erklären. Ob die Größe der Supervoid tatsächlich zu unserer Theorie passt oder nicht, ist momentan noch nicht klar.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ISTOCK / PR3T3ND3R

Um diesbezüglich zuverlässigere Aussagen machen zu können, benötigen wir mehr Daten. Künftig wollen wir unsere Studie mit dem gesamten von Pan-STARRS PS1 erfassten Teil des Himmels wiederholen. Bei den inzwischen vorliegenden Beobachtungen konnten die Wissenschaftler außerdem anfangs vorhandene Ungenauigkeiten reduzieren. Damit werden wir die Abweichungen zwischen unseren Messungen und der Theorie genauer bestimmen können und so feststellen, ob wir unsere Vorstellungen über Voids und den ISW-Effekt überdenken müssen.

Möglicherweise teilt uns der großflächige Temperaturunterschied in der kosmischen Hintergrundstrahlung aber auch noch etwas anderes Interessantes mit. So haben etwa eine Reihe alternativer Gravitationstheorien, die von der allgemeinen Relativitätstheorie abweichen, Auswirkungen, die sich nur in Voids zeigen. Erwies sich eines dieser Modelle als korrekt, würde das den ISW-Effekt verändern.

Doch wie immer das Ergebnis letztlich lauten wird: Die Supervoid wird uns wichtige physikalische Erkenntnisse liefern. Vielleicht einen Beweis für die Existenz der Dunklen Energie oder überraschende Wahrheiten über die Gravitation. In den kommenden Jahren werden wir noch viel mehr über diese große Leere lernen – und damit auch über das Universum, in dem wir leben. ◀

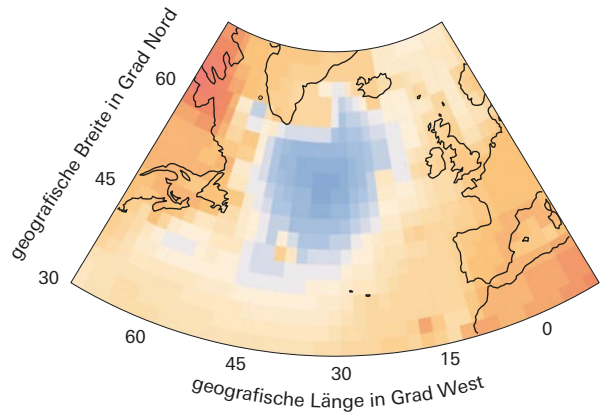
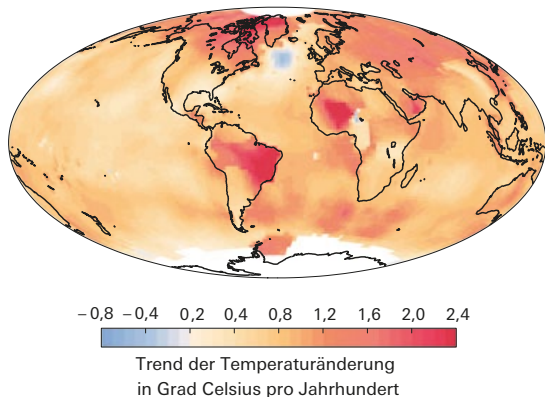
QUELLEN

Szapudi, I. et al.: Detection of a Supervoid Aligned with the Cold Spot of the Cosmic Microwave Background. In: *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.*, Vol. 450, No. 1, S. 288–294, 2015

LITERATURHINWEISE

Starkman, G. D. und Schwarz, D. J.: Missklänge im Universum. In: *Spektrum* Dezember 2005, S. 30–37
Wie die Beobachtungen vom kosmologischen Modell abweichen.

RAHMSTORF, S. ET AL.: EXCEPTIONAL TWENTIETH-CENTURY SLOWDOWN IN ATLANTIC OCEAN OVERTURNING CIRCULATION. IN: NATURE CLIMATE CHANGE 5, S. 475-480, 2015, FIG. 1



Ein großes Gebiet im Nordatlantik (blau) hat sich in den letzten 100 Jahren entgegen dem allgemeinen Trend abgekühlt.

KLIMAFORSCHUNG DAS GOLFSTROMSYSTEM IN GEFAHR?

Nach einer neuen Simulation ist die gigantische Umwälzströmung im Atlantik weit weniger stabil, als bisherige Modellrechnungen glauben machen.

Die ganze Welt erwärmt sich. Die ganze Welt? Nein! Eine Region im subpolaren Atlantik hat sich im vergangenen Jahrhundert abgekühlt – einmalig unter den Weltgegenden mit ausreichender Datenabdeckung (Bild oben). Das Jahr 2015 war in dieser Meeresregion sogar das kälteste seit Beginn der Aufzeichnungen im 19. Jahrhundert, während es global das wärmste war (inzwischen allerdings durch das Rekordjahr 2016 schon wieder entthront). Was ist so besonders an dieser Region zwischen Neufundland und Irland?

Es handelt sich just um jene Gegend, für die Klimamodelle eine Abkühlung vorhersagen, wenn das Golfstromsystem sich abschwächt. In den letzten Jahren häufen sich die Belege, dass dieser Prozess bereits im Gang ist. Die beiden jüngsten Berichte des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) kommen zu dem Schluss, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 90 Prozent mit einer Abschwächung in diesem Jahrhundert zu rechnen ist.

Eine neue Studie der renommierten Scripps Institution of Oceanography in San Diego und der University of Wisconsin in Madison stützt nun darüber hinaus die Befürchtung, das großräumige System der Meeresströmungen, das insbesondere Europa sein mildes Klima beschert, könnte unter den Folgen des Klimawandels völlig zusammenbrechen.

Der Golfstrom gehört zum oberflächlichen Teil der »Atlantic Meridional Overturning Circulation« (AMOC). Wie

in einem gigantischen Förderband sinkt salzreiches, abgekühltes und daher dichteres Meerwasser in arktischen Breiten in die Tiefe und strömt dort südwärts über den Äquator hinaus, bis es, sich mit dem antarktischen Zirkumpolarstrom vermischend, wieder an die Oberfläche tritt (Bild unten; siehe auch *Spektrum* Mai 2013, S. 66). Von dort aus fließt es nordwärts und schließt so den Kreislauf. Der eigentliche Golfstrom würde zwar selbst bei einem kompletten Versiegen der AMOC noch – mit verminderter

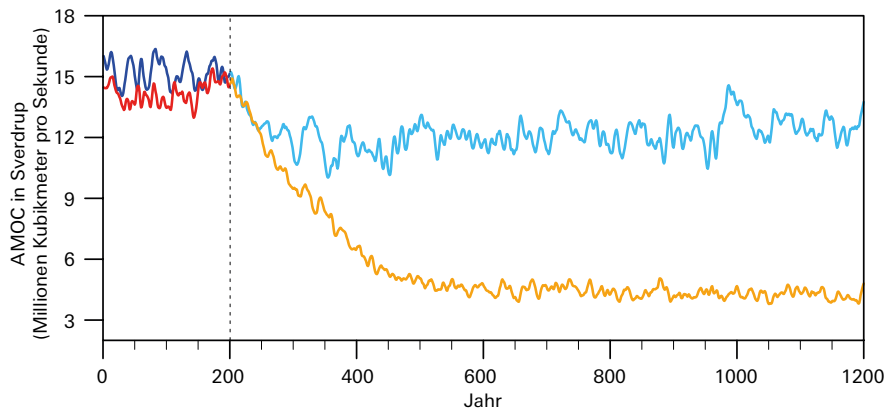


Das Schema der Atlantikströmungen (stark vereinfacht): In Rot die relativ warme Oberflächenströmung, in Blau die kalte Tiefenströmung. Der nordwärtige Oberflächenstrom und der südwärtige Tiefenstrom ergeben zusammen die Umwälzbewegung des Atlantiks (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC), auch als Golfstromsystem bekannt.

Grafik: Stefan Rahmstorf (Scripps Institution of Oceanography/UCSD) und Stefan Rahmstorf (Scripps Institution of Oceanography/UCSD) (Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License)

Die Atlantikströmung (AMOC) in den beiden Modellvarianten

Im Modelljahr 201 wird die CO₂-Konzentration verdoppelt und danach auf diesem Niveau belassen. Blau und hellblau die Flussrate der AMOC ohne die im Text beschriebene Korrektur, rot und orange mit Korrektur.



LUI, W. ET AL. - OVERLOOKED POSSIBILITY OF A COLLAPSED ATLANTIC MERIDIONAL OVERTURNING CIRCULATION IN WARMING CLIMATE. IN: SCIENCE ADVANCES 3, E 1601666, 2017. FIG. 1C. MIT FRBL GEN. VON WELIU. ABRUCK GENEHMIGT VON SCIENCE ADVANCES

Stärke – weiterfließen, da er überwiegend von Winden angetrieben wird. Der klimatisch bedeutende Wärmetransport ist jedoch auf die großräumige Umwälzströmung zurückzuführen.

Diese wiederum wird von den Dichteunterschieden verursacht, die ihrerseits Folge von Differenzen in Salzgehalt und Temperatur sind. In den nördlichen Atlantik fließt zwar ständig Süßwasser durch Niederschläge, Flüsse und Eisschmelze. Doch auf seinem Weg von Süden her hat

sich das Golfstromwasser durch Verdunstung mit Salz angereichert und gleicht dies aus.

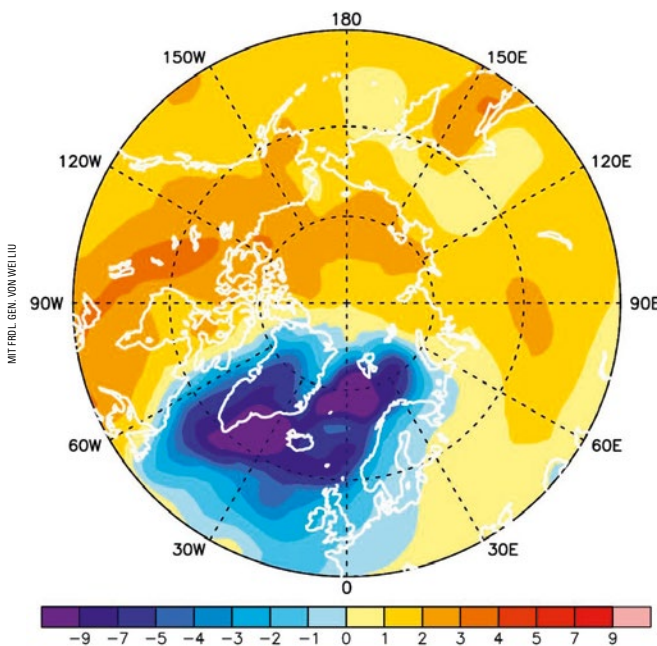
Infolge der Klimaerwärmung nimmt, vor allem durch Eisschmelzen, der Süßwassereintrag zu. Das salzärmere Meerwasser ist leichter als salzigeres Wasser und sinkt daher nicht so bereitwillig in die Tiefe ab. Damit verringert sich der Antrieb, und die Strömung erlahmt. Dadurch sammelt sich weiteres mit Süßwasser verdünntes Wasser an der Oberfläche, und der Antrieb lässt weiter nach. Ab einem gewissen kritischen Punkt wird das zum unaufhalt-samen Teufelskreis.

Süßwasserbilanz der atlantischen Umwälzströmung

Dies ist einer der klassischen Kipppunkte im Klimasystem. Er beschäftigt die Wissenschaft spätestens, seit Wallace Broecker 1985 in einem Aufsatz in »Nature« abrupte Klimaänderungen in der Erdgeschichte auf Instabilitäten der Atlantikströmung zurückführte und vor »unangenehmen Überraschungen im Treibhaus« warnte.

Wo dieser Kipppunkt genau liegt, ist nach wie vor unklar. Die allermeisten Modelle zeigen bei typischen globalen Erwärmungsszenarien bis 2100 zwar eine deutliche Abschwächung des Golfstromsystems um 20 bis 50 Prozent, überschreiten aber nicht den Kipppunkt. Allerdings streuen die Modelle stark – was nicht überrascht, da die Stabilität der Atlantikströmung von einer subtilen Balance im Süßwasserhaushalt abhängt. Der ist jedoch nur recht ungenau berechenbar; denn die vom Klimamodell berechneten Zugewinne durch Flüsse, schmelzendes Eis und Niederschläge sowie die Verluste durch Verdunstung sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet.

Und nicht nur dies. Seit etlichen Jahren gibt es deutliche Hinweise darauf, dass Klimamodelle hier systematisch danebenliegen. Dazu hatte ich 1996 ein Diagnoseverfahren vorgeschlagen, das den Beitrag der Umwälzströmung im Atlantik zum Süßwasserhaushalt erfasst. Diesen kann man am besten am Südpol des Ozeanbeckens bei 30° Süd erfassen, indem man dort den Einstrom an der Oberfläche und den Ausstrom in der Tiefe mit deren jeweiligen Salz-



Die Temperaturveränderung in Grad Celsius in den Wintermonaten, 300 Jahre nach der CO₂-Verdoppelung im Simulationsexperiment (siehe »Die Atlantikströmung in den beiden Modellvarianten«, oben). Zu diesem Zeitpunkt ist die Atlantikströmung fast komplett erloschen. Daraufhin hat sich der nördliche Atlantikraum deutlich abgekühlt.

gehalten miteinander verrechnet. Dazu nutzt man ozeanografische Messdaten aus den verschiedenen Tiefenschichten quer über den Atlantik. Will man es noch genauer wissen, kann man auch den relativ geringen Austausch von Norden her durch den arktischen Ozean berücksichtigen.

Nach dem Ergebnis dieser Arbeiten exportiert die Umwälzzirkulation des Atlantiks in der Bilanz Süßwasser über die Grenze nach Süden und schafft damit das Süßwasser fort, das an der Oberfläche in den Atlantik eingebracht wird.

Im Gegensatz zu diesem Befund kommen die meisten Modelle zu dem Ergebnis, dass die Umwälzzirkulation des Atlantiks Süßwasser importiert statt exportiert. Damit würde das ganze System über eine stabilisierende Rückkopplung verfügen: Schwächt diese Strömung sich ab, importiert sie auch weniger Süßwasser, und damit wird der Atlantik salziger. Das aber stärkt die Strömung wieder, weil salzigeres Wasser leichter absinkt. Im Ergebnis sagen die Modelle voraus, dass die Atlantikströmung keinen Umkipppunkt hat.

Bisherige Modelle überschätzen die Stabilität der Atlantikströmung

Im Licht der neuen Erkenntnisse erscheint das als eine zu optimistische Folgerung. Denn da die Umwälzzirkulation im echten Atlantik offenbar Süßwasser exportiert, funktioniert die Rückkopplung dort andersherum: Sie destabilisiert das System.

Die bisherigen Modelle überschätzen also grundlegend die Stabilität der Atlantikströmung. Dazu passt auch, dass sie den beobachteten Abkühlungstrend im subpolaren Atlantik unterschätzen, der nach unserer Überzeugung ein Hinweis auf ein erlahmendes Golfstromsystem ist.

In der eingangs genannten Studie versuchen nun Wei Liu und seine Kollegen dieses Defizit zu korrigieren, indem sie in einem der gängigen globalen Klimamodelle, dem Modell CCSM3 des National Center for Atmospheric Research, den Süßwassereintrag an der Meeresoberfläche gezielt veränderten. Dazu verglichen sie den vom Modell berechneten Salzgehalt an der Oberfläche mit dem in der Realität und addierten zum berechneten Süßwassereintrag einen Beitrag, der proportional zur Differenz zwischen berechnetem und echtem Salzgehalt ist.

Das ist sinnvoll – denn während Niederschlag und Verdunstung über den Ozeanen schwer messbar und daher nur sehr ungenau bekannt sind, haben wir über die Verteilung des Salzgehalts detaillierte und präzise Informationen aus Schiffsmessungen. Durch diese »Flusskorrektur« (flux adjustment) gleichen sich die Salzgehalte des modellierten Atlantiks auf die Dauer denen des echten an, ohne dass sich im Übrigen das modellierte Klima nennenswert ändert. Und die modellierte Umwälzzirkulation im Atlantik exportiert jetzt auch Süßwasser, wie der echte Ozean.

Mit beiden Modellvarianten – mit und ohne die subtile Korrektur der Süßwasserbilanz – haben die amerikani-

schen Kollegen nun ein Experiment durchgeführt, bei dem die CO₂-Menge in der Luft plötzlich verdoppelt wurde (Bild S. 21 oben). Ohne Korrektur erweist sich die Zirkulation als sehr stabil gegenüber der massiven Störung. Mit der Korrektur dagegen bricht die Strömung im Laufe von rund 300 Jahren zusammen. Schon nach 100 Jahren hat sie ein Drittel ihrer Kraft verloren. In der Folge kühlt erwartungsgemäß der Nordatlantikraum großräumig ab (Bild S. 21 unten). Dabei sind auch Landgebiete betroffen, neben Grönland und Island vor allem Großbritannien und Skandinavien.

Diese neue Studie ist sicher nicht das letzte Wort in dieser wichtigen Frage. Im Vergleich mit den Messdaten scheint die Korrektur etwas zu stark zu sein – die korrigierte Modellversion könnte daher zu instabil sein. Und selbstverständlich wird sich die CO₂-Konzentration nicht abrupt verdoppeln. Die Autoren haben ein solches Extremszenario gewählt, um rasch einen ersten Eindruck von der Wirkung ihrer Korrektur zu bekommen – Rechenzeit ist knapp und teuer. Schließlich wurde das Experiment nur mit einem einzigen Klimamodell durchgeführt; für robuste Schlüsse wartet man normalerweise, bis eine Reihe von Modellen, dann auch mit realistischeren Annahmen, übereinstimmende Resultate zeigt.

Die genaueren Rechnungen werden allerdings nicht unbedingt beruhigender ausfallen. Bislang wurde nämlich der Schmelzwasserzufluss vom schwindenden Kontinentaleis auf Grönland nicht berücksichtigt. Nach einer Reihe weiterer Forschungsergebnisse könnte dieser Effekt dem Golfstromsystem in Zukunft stark zusetzen.

Beide Faktoren, die überschätzte Stabilität der Atlantikströmung und die Eisschmelze von Grönland, führen also jeder für sich zu einer erheblich stärkeren Abschwächung des Golfstromsystems. Als Nächstes gilt es jetzt zu untersuchen, wie diese beiden Faktoren zusammenwirken.

Hoffentlich werden die Besorgnis erregenden neuen Ergebnisse möglichst viele andere Forschergruppen veranlassen, dieser Frage mit ihren eigenen Modellen nachzugehen. ◀

Stefan Rahmstorf leitet die Abteilung Erdsystemanalyse am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und lehrt an der Universität Potsdam.

QUELLEN

Lenton, T. M. et al.: Tipping Elements in the Earth's Climate System. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 105, S. 1786–1793, 2008

Liu, W. et al.: Overlooked Possibility of a Collapsed Atlantic Meridional Overturning Circulation in Warming Climate. In: Science Advances 3, e1601666, 4. Januar 2017

Rahmstorf, S. et al.: Exceptional Twentieth-century Slowdown in Atlantic Ocean Overturning Circulation. In: Nature Climate Change 5, S. 475–480, 2015

Eine frühere Version dieses Artikels ist online unter <http://scilogs.spektrum.de/klimalounge/die-unterschaetzte-gefahr-eines-versiegens-des-golfstromsystems/> erschienen. Dort finden sich zahlreiche weitere Literaturhinweise und Weblinks.

NEUROBIOLOGIE KAMPF DEM KRATZZWANG

Forscher identifizieren die Nervenzellen, die Juckreiz zum Gehirn weiterleiten. Das weckt Hoffnungen, die quälende Empfindung bei chronischen Erkrankungen wie Neurodermitis besser bekämpfen zu können.

► Eine zentrale Schaltstelle für unsere Wahrnehmung sind Nervenzellen, die rechts und links entlang der Wirbelsäule in wenigen Millimeter großen Ansammlungen sitzen: den Spinalganglien. Ihre Ausläufer erstrecken sich in alle Gewebe des Körpers und registrieren dort unter anderem Berührung, Druck, Temperatur, aber auch Schmerzen und Jucken bei allergischen Reaktionen oder Entzündungen. Über die Spinalganglienzellen gelangen solche Statusinformationen des Körpers zum Rückenmark und darüber letztlich zum Gehirn.

Bisher hat man diese Neurone nur grob nach Größe und einigen wenigen typischen Genprodukten klassifiziert. Zwei Forschergruppen aus Stockholm und aus Schanghai ist es nun gelungen, verschiedene Arten von Ganglienzellen wesentlich detaillierter als bisher voneinander abzugrenzen. Damit lassen sich unter anderem gezielte therapeutische Ansatzpunkte für Erkrankungen mit quälendem Juckreiz finden.

Die Wissenschaftler um Patrik Ernfors und Sten Linnarsson am Stockholmer Karolinska Institut werteten für ihre Untersuchung insgesamt 1,3 Milliarden DNA-Analysen von Spinalganglienzellen aus. Jeder einzelnen Zelle ordneten sie dabei im Mittel 3574 Gene zu. Aus dieser Datenflut extrahierten sie Zellgruppen, in denen die gleichen Gene aktiv waren. Ernfors' und Linnarssons Ergebnisse stimmen mit den bisherigen Befunden überein, erlauben jedoch eine viel feinere Einteilung. Demnach gibt es in den Spinalganglien mehr als doppelt so viele unterschiedliche Zellpopulationen wie bisher bekannt.

Laut der Studie vermitteln drei verschiedene Klassen von Nervenzellen Juckreiz. Eine davon scheint besonders in entzündeter Haut für diese Empfindung zuständig zu sein. Sie ist wohl auch für das quälende Jucken bei Neurodermitis verantwortlich, vermuten die Autoren.

Ein weiterer Fachartikel, der unabhängig von der Stockholmer Arbeit und fast zeitgleich erschien, unterstützt die Ergebnisse der Schweden. Eine Schanghaier Forschergruppe um Xu Zhang identifizierte mit einer ähnlichen Methode, die sogar mehr als dreimal so viele Gene pro Nervenzelle erfasste, 17 verschiedene Klassen von Nervenzellen. Die Resultate der beiden Studien stimmen teils gut überein: Auch Zhangs Daten weisen auf die kleine Gruppe von Zellen hin, die im entzündeten Gewebe Juckreiz vermitteln.

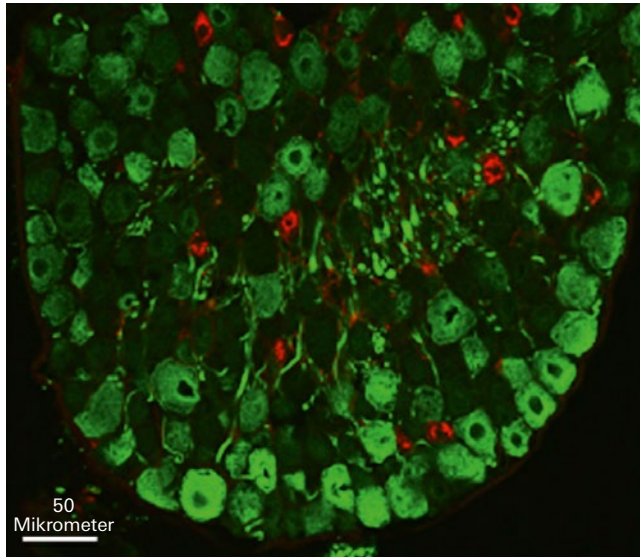
Ganz deckungsgleich seien die Ergebnisse allerdings nicht, betont Michael Fischer, Professor für Molekulare Physiologie an der Medizinischen Universität Wien. Es werde einige Jahre dauern, bis die jetzt vorgeschlagenen

JAHR GANGS CD-ROM 2016



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

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



Die kleinen Neurone (rot), die in den Spinalganglien den Juckreiz bei Entzündungen vermitteln, liegen zwischen zahlreichen anderen Nervenzellen (grün). Sie machen etwa fünf Prozent aller Ganglienneurone aus.

Nervenklassen sicher bestätigt seien. Und vielleicht gebe es ja noch mehr als die jetzt beschriebenen. Von den für das Jucken bei Entzündungen zuständigen Zellen scheinen die Forscher nun aber schon ein recht genaues Bild zu haben.

Bereits seit November 2013 prüfen klinische Studien einen neuen Wirkstoff, der wohl an exakt diesen Zellen angreift. Er soll Neurodermitispatienten helfen, welche die üblichen Medikamente nicht vertragen oder keine ausreichende Besserung durch sie verspüren. Nemozumab (CIM 331) heißt das Präparat und dient als experimentelle Behandlungsoption in Neurodermitiszentren wie dem von Andreas Wollenberg, Oberarzt am Klinikum der Universität München. Zu ihm kommen Betroffene, bei denen die klassische Therapie versagt.

Etwa 200 Patienten erhalten in seinem Zentrum weiterführende Beratung und bei Bedarf auch experimentelle Therapien, die noch keine endgültige Zulassung haben. Insbesondere wenn Salben nicht helfen und eine systemische Therapie notwendig ist, die im gesamten Körper wirkt, greifen die Münchener auf Studienmedikamente zurück. Wollenberg erwartet von den neuen Immuntherapeutika aus den klinischen Studien einen großen Nutzen bei geringen Nebenwirkungen im Vergleich zu einer herkömmlichen Behandlung mit dem immunhemmenden Ciclosporin oder der Einnahme von Kortikosteroiden. Besonders Letztere sehen Experten wie er wegen der Gefahr von Langzeitschäden, allen voran Stammfettsucht, Bluthochdruck und Diabetes, kritisch.

Die Alternative Nemozumab wird in die Haut gespritzt und bindet an einen der Marker, den die jetzt identifizierten Juckreizzellen auf ihrer Oberfläche tragen: den Inter-

leukin-31-Rezeptor. Interleukin-31 wird in der entzündeten Haut der Patienten von Immunzellen freigesetzt. Wenn es sich an den passenden Rezeptor auf Nervenzellen bindet, melden diese ein Jucksignal ans Gehirn. Nemozumab soll das Andocken verhindern und so die Informationskette beim Jucken unterbrechen.

Ein therapeutischer Antikörper kann die Schlafqualität deutlich verbessern

Ende September 2016 wurden auf der Konferenz der European Academy of Dermatology and Venereology (EADV) die Ergebnisse einer abgeschlossenen Phase-II-Studie mit 216 Patienten vorgestellt. Abhängig von der Konzentration des Medikaments schätzten 41 bis 67 Prozent der behandelten Patienten den Juckreiz als maximal halb so stark ein wie zu Beginn der dreimonatigen Testphase. Von jenen, die ein Placebo erhielten, berichteten nur 21 Prozent von einer derart ausgeprägten Besserung. Im Vergleich zum Placebo führte die Nemozumab-Behandlung zu messbar höherer Schlafqualität mit weniger Wachzeiten und einer im Mittel um 50 bis 64 Prozent besseren subjektiven Bewertung von Schlafstörungen. Diese Zahlen stimmen optimistisch; die Variabilität zwischen den Patienten war jedoch hoch. Weitere Studien an einer größeren Gruppe, auch im Vergleich zur bisherigen Behandlung, müssen zeigen, ob Nemozumab tatsächlich einen klaren Zusatznutzen für den Patienten leisten wird.

Klassifizierungsstudien wie die zuvor erwähnte sind zwar nicht zwingend notwendig, um viel versprechende Therapeutika zu entwerfen. Sie helfen allerdings zu verstehen, wo genau das Medikament im Körper angreift und wie es darüber die Symptome lindert. Auch wenn die Nemozumab-Studie bereits läuft, zeigen nun die aktuellen molekularen Klassifizierungen, dass es tatsächlich eine präzise abgrenzbare Zielpopulation von Nervenzellen gibt, die das Medikament beeinflussen kann. Zudem dürfte die differenzierte Charakterisierung der Neurone noch weitere Angriffspunkte liefern, um Juckreiz vermittelnde Zellen abzuschalten. ◀

Sandra Lehnert ist Molekularmedizinerin und promoviert im Fach Neurowissenschaften an der Universität Erlangen. Als Wissenschaftsjournalistin begeistern sie elegante Methoden und große Zahlen.

QUELLEN

Li, C.L. et al.: Somatosensory Neuron Types Identified by High-coverage Single-cell RNA-Sequencing and Functional Heterogeneity. In: Cell Research 26, S. 83-102, 2016

Nemoto, O. et al.: The First Trial of CIM331, a Humanized Anti-human Interleukin-31 Receptor A Antibody, in Healthy Volunteers and Patients with Atopic Dermatitis to Evaluate Safety, Tolerability and Pharmacokinetics of a Single Dose in a Randomized, Double-blind, Placebo-controlled Study. In: British Journal of Dermatology 174, S. 296-304, 2016

Usoskin, D. et al.: Unbiased Classification of Sensory Neuron Types by Large-scale Single-cell RNA Sequencing. In: Nature Neuroscience 18, S. 145-153, 2015

ARCHÄOLOGIE

VERSCHWUNDENEN GOLD-LETTERN AUF DER SPUR

Ausgerechnet die den römischen Kaisern gewidmeten goldenen Bauinschriften haben die Jahrhunderte nicht überdauert. Nun ist es gelungen, einige dieser »litterae aureae« von Monumenten in Kleinasien zu rekonstruieren.

► In der römischen Provinz Asia des 1. und 2. Jahrhunderts n. Chr. bekundeten vergoldete Inschriften auf Friesen und Architraven der Tempel und Bogenmonumente, welchem Kaiser die Stadt den jeweiligen Prachtbau widmete – und um wessen Gunst sie buhlte. Bronzegießer hatten die Buchstaben gefertigt und vergoldet, dann hat man sie mit Stiften im Stein verankert. Leider wurden die meisten dieser »litterae aureae« irgendwann eingeschmolzen, das Metall wiederverwertet. Forscher versuchen, die verschwundenen Texte zu rekonstruieren, beispielsweise um die Monumente zu datieren oder neue Informationen über ihren Zweck zu gewinnen.

Aufschluss könnten die Stiftlöcher geben, die sich im Stein noch nachweisen und dokumentieren lassen – sofern ein eindeutiger Bezug zu den dort fixierten Buchstaben existiert. Doch im Osten des Imperiums war Grie-

chisch gebräuchlich, und während zum Beispiel eine Verankerung mit drei Stiften in Form eines Dreiecks bei lateinischen Texten mit Sicherheit den Buchstaben »A« hielt, hätte es bei griechischen auch ein Λ (Lambda) oder ein Δ (Delta) sein können.

Der Tübinger Archäologe Richard Posamentir ging dieses Problem zunächst mit speziellen Aufnahmetechniken an. Insbesondere Architravblöcke des Zeus-Tempels in Aizanoi, einer im phrygischen Hochland (heute Türkei) gelegenen Stadt, gaben entscheidende Hinweise. Posamentir vermutete, dass die Metallbuchstaben den darunterliegenden Stein vor dem Verwittern schützten. Er machte die Oberflächenstruktur deshalb mit Streiflicht- und Ultravioletttaufnahmen sichtbar. Zwar bestätigte sich die Arbeitshypothese nicht, dafür wurde ein bislang von Forschern kaum beachtetes Detail sichtbar: Die quadratischen bis leicht rechteckigen Stiftlöcher wiesen seitlich kleine Kanäle auf, über die man wohl flüssiges Blei hineingegossen hatte, um die Stifte der Buchstaben zu fixieren.

Sie durften die Kanäle freilich nicht verdecken. Mit dieser Zusatzinformation identifizierte Posamentir gemeinsam mit dem Münchner Epigraphiker Michael Wörrle Muster von Stiftlöchern für immer dieselben Buchstabenwerte (siehe Grafiken S. 26). Welcher Buchstabe nun tatsächlich jeweils vorlag, ließ sich über den Vergleich der Muster mit Bauinschriften etwa aus Ephesos oder Nikaia erkennen, denn dort waren die Buchstaben zusätzlich eingetieft worden, ihre Umrisse noch erkennbar.



Zeus war der Stadtgott von Aizanoi in der heutigen Türkei. Sein Tempel zeugt vom Reichtum der Gemeinschaft in der römischen Kaiserzeit.

RICHARD POSAMENTIR, MIT FOT. GEN. VON SEBASTIAN KIRSCHNER

Nunmehr konnten die Forscher den Text von Aizanoi rekonstruieren und übersetzen: »Dem Zeus von Aizanoi und dem Imperator Caesar, Sohn des divus Vespasianus, Domitianus Augustus Germanicus, Pontifex maximus, in dessen 11. Tribunicia potestas, dem Imperator zum 12. Mal, Consul zum 16. Mal, Censor perpetuus, dem Vater des Vaterlandes, hat [den Tempel] die Bürgergemeinde von Aizanoi errichtet.« Daraus folgern die Forscher, dass das Heiligtum auch dem Kaiser Domitian geweiht worden war. »Vielleicht wollte man den Herrscher mit dieser Geste dazu bewegen, der Stadt den Ehrentitel Metropolis zu verleihen«, vermutet Posamentir. Anstatt wie bisher üblich über den Bauschmuck datierten er und Wörrle den Tempel zudem anhand der Angaben auf das Jahr 92 n. Chr. Das war die Zeit der flavischen Kaiser, also nahezu zwei Generationen früher als bisher angenommen.

Zwar fanden sich bei anderen Inschriften keine Gusskanäle, doch die entdeckten Muster der Stiftlöcher ließen sich übertragen. So wies der Forscher beim Tempel des Caracalla (regierte 211–217 n. Chr.) in Pergamon nach, dass der ursprünglich Kaiser Hadrian (regierte 117–138 n. Chr.) und seiner Gattin Sabina gewidmet war.

Bei einem Heiligtum vor dem großen Heraion von Samos zeigte die neuerliche Untersuchung einiger Steinblöcke, dass manche Stiftlöcher in den Umzeichnungen früherer Forscher falsch ausgerichtet wiedergegeben, andere ganz übersehen worden waren. Dank der Korrekturen war die Inschrift nun lesbar und identifizierte einen Kultbau für die vergöttlichte Livia.

Die Rekonstruktionen zeigten auch, dass das Anbringen solcher vergoldeten Inschriften häufig aus einem für die jeweilige Stadt wichtigen Anlass geschah. »Meist war es die Verleihung von prestigeträchtigen und wohl zudem wirtschaftlich bedeutenden Ehrentiteln, mitunter sogar der Besuch oder die Vergöttlichung von Mitgliedern des Kaiserhauses«, erklärt Posamentir.

Künftig sollen auch »litterae aureae« aus dem italischen Raum noch einmal bearbeitet werden. Deren Tradition reicht bis zu Kaiser Augustus (regierte 27 v. Chr.–14 n. Chr.) zurück. Dieser gab als Erster solche monumentalen Inschriften in Auftrag, wohl um den Bürgern Roms das Goldene Zeitalter unter seiner Herrschaft vor Augen zu führen. Der Heidelberger Althistoriker Géza Alföldy (1935–2011) hatte maßgeblich zur Entzifferung beigetragen. Es gibt aber etliche nur unvollständig erhaltene Exemplare, hier könnten die neuen Methoden helfen, ihnen weitere Informationen zu entlocken. ◀

Sebastian Kirschner ist Archäologe und Wissenschaftsjournalist in München.

QUELLEN

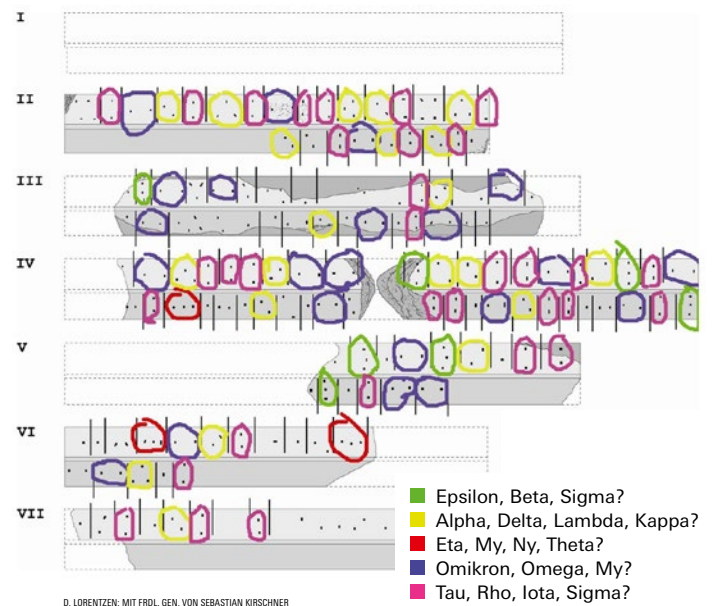
Posamentir, R.: Der so genannte Caracalla-Tempel von Pergamon: Ein Bau zu Ehren Hadrians und seiner Gattin Sabina. *Istanbuler Mitteilungen des DAI*, in Vorbereitung

Posamentir, R.: Die neue Hera: Ein Tempel für Livia auf Samos, *Athenische Mitteilungen des DAI*, in Vorbereitung



RICHARD POSAMENTIR, MIT FRDL. GEN. VON SEBASTIAN KIRSCHNER

Mit Stiften waren die Bronzelettern in den Blöcken des Architravs (oben; der Block steht auf dem Kopf) fixiert worden. Eine Gruppierung der Stiftlöcher (unten; farbige Kreise) ermöglichte es nicht, sie eindeutig bestimmten griechischen Buchstaben zuzuordnen. Erst weitere Informationen erlaubten eine Rekonstruktion der Inschrift. Dabei trägt jeder Block Teile zweier Zeilen, die römischen Zahlen geben die Leserichtung an.



D. LORENTZEN; MIT FRDL. GEN. VON SEBASTIAN KIRSCHNER



MIKROBIOLOGIE

KRIEG DER VIREN

Viren vermehren sich auf Kosten ihrer Wirtszellen und schädigen so Bakterien, Pflanzen und Tiere. Doch einige Riesenviren können ihrerseits infiziert werden – und zwar von anderen, parasitären Viren.

► Vor knapp 25 Jahren fischten Forscher um Didier Raoult ein ungewöhnliches Partikel aus dem Wasser eines britischen Kühlturms. Als sie die Wasserproben unter einem Mikroskop betrachteten, glaubten die Forscher zuerst, Mikroben vor sich zu haben – die Gebilde hatten die richtige Größe und reagierten auf eine Substanz, die spezifisch Bakterien anfärbt. Doch die ikosaedrischen Partikel waren gar keine Lebewesen; sie stellten sich als die größten damals bekannten Viren heraus.

Seither haben Wissenschaftler viele weitere Rekordviren gefunden (siehe auch **Spektrum** November 2014, S. 18). Manche sind größer als Bakterien, und einige besitzen sogar ein vergleichbar umfangreiches Genom. Die Funde stammen aus aller Welt; Riesenviren sind bereits in Wassertanks, Seen, Meeren, im sibirischen Permafrost und sogar in Kontaktlinsenflüssigkeit aufgetaucht.

Aber keiner dieser Giganten ist ein eigenständiger Organismus. Weder haben sie einen eigenen Stoffwechsel noch können sie sich ohne die Hilfe anderer Organismen fortpflanzen. Um sich zu vermehren, dringen sie in einen Wirt ein und nutzen seine Ressourcen. Damit erfüllen sie zwar nicht die Voraussetzungen von biologischem »Leben«, dennoch plagt auch Riesenviren etwas, das sonst nur Lebewesen heimsucht: ein Virus.

Des Parasiten Parasit

Erstmals beobachtet hat die virusattackierenden Viren der eingangs genannte Didier Raoult von der Université d'Aix-Marseille im Jahr 2008. Er und sein Team isolierten ein infektiöses Partikel, das 50 Nanometer maß und damit nur ein Zehntel so groß war wie Riesenviren. Das Genom dieses Winzlings bestand aus einigen wenigen Genen. Das neue Virus hatte jedoch eine ganz besondere Eigenschaft: Es schien sich ausschließlich dann zu vermehren, wenn auch das Riesenvirus APMV anwesend war. Raoult und seine Kollegen gaben ihm deshalb den Namen Sputnik – nach dem ersten Satelliten, der die Erde umkreiste.

Beide Viren tummelten sich im Experiment immer zusammen im gleichen Bereich infizierter Amöben. Doch während Sputnik hier gedieh, traf das auf APMV nicht zu. Die Riesenviren lagerten sich fehlerhaft zusammen: Ihre Hüllen verklumpten zu Haufen, statt Viruspartikel zu formen. In Anwesenheit von Sputnik fiel die Zahl korrekt geformter, funktionstüchtiger APMV-Partikel auf ein Drittel ab. Das kleine Virus machte dem großen also auf irgendeine Art zu schaffen. Anscheinend verhielt es sich wie ein Parasit, der auf Kosten des Riesen gedieh. Die Forscher kamen zu dem Schluss, das infektiöse Partikel sei das

erste einer neuen, noch unbekanntenen Gruppe von Viren, die Viren befallen, so genannten Virophagen (»Viren-Fressern«).

Sputnik schadete nicht nur dem Riesenvirus, er half gleichzeitig den Wirtszellen. Knapp dreimal so viele Amöben überlebten, wenn sie APMV und Sputnik ausgesetzt waren statt nur APMV. Aber wie schützte das kleine Virus sie? Das war den Forschern ein Rätsel. Ihre Studie lieferte kaum Hinweise darauf, wie die Virophagen vorgehen. Auch, ob große Mengen von Sputnik-Partikeln eine infizierte Zelle auf Dauer doch schädigen, blieb vorerst unklar.

Eine einfache Virusinfektion ist tödlich, eine doppelte harmlos

Etwa acht Jahre später kristallisiert sich nun heraus, wie Virophagen mit Riesenvirus und Wirtszelle interagieren. Studien des Mikrobiologen Matthias Fischer vom Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg und seines Kollegen Thomas Hackl vom amerikanischen Massachusetts Institute of Technology (MIT) haben gezeigt, dass die Beziehung zwischen den dreien wahrscheinlich komplizierter ist als zuvor angenommen. Denn nicht jeden Wirt ereilt nach einer Infektion das gleiche Schicksal.

Die beiden Wissenschaftler experimentierten mit dem einzelligen Flagellaten *Cafeteria roenbergensis*, der dem marinen Nanoplankton angehört und vom Riesenvirus CroV infiziert wird. Befällt CroV seinen Wirt, geht das für den Einzeller fast immer tödlich aus: Von 100 infizierten Zellen leben acht Tage später im Schnitt nicht einmal mehr zwei. Anders sieht die Sache aus, wenn der Virophage Mavirus anwesend ist – dann verläuft der Befall viel milder. Acht Tage nach einer CroV/Mavirus-Doppelinfection finden sich nicht etwa weniger Flagellaten im Meerwasser, sondern bis zu 65-mal so viele wie am Anfang. Denn zahlreiche Einzeller erliegen der Virusattacke nun nicht mehr, sie können sich vermehren und die Populationsgröße explosionsartig nach oben treiben. Ein ähnliches Populationswachstum stellten die Wissenschaftler nur fest, wenn sie die Zellen dem Riesenvirus gar nicht erst aussetzten.

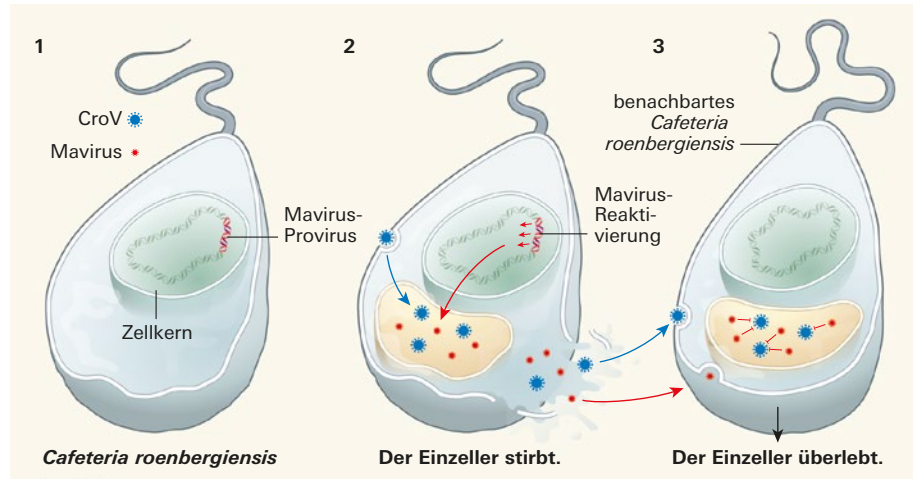
Die Mechanismen dahinter haben die beiden Forscher in ihrer neuen Studie genauer untersucht. Zunächst infizierten sie *C. roenbergensis* mit CroV und Mavirus. Dann pickten sie einige Einzeller aus der Lösung und ließen diese in eigenen Behältern heranwachsen. Flagellaten, welche die Infektion überstanden hatten, vermehrten sich darin schon bald.

Fischer und Hackl untersuchten Kulturlösungen, in denen solche Überlebenden gediehen, auf Mavirus-DNA – und wiesen sie im Genom diverser Zellen nach. Das Virus hatte sich in die DNA etwa jedes dritten Flagellaten integriert. Dort überdauert es in einem Ruhezustand als so genanntes Provirus.

Schnell wurde klar, was den Schneewittschlaf beenden kann: Als die Forscher die Einzeller abermals mit CroV infizierten, tauchten auch wieder funktionelle Mavirus-

Virus schützt vor Virus

Der Virophage Mavirus befällt den Einzeller *Cafeteria roenbergensis*. Manchmal integriert er sich ins Wirtsgenom und wartet dort als Provirus auf Reaktivierung (1). Dringt das Riesenvirus CroV in die Zelle ein, produziert diese daraufhin Partikel beider Viren (2), die nach dem Tod des Einzellers freigesetzt werden. Benachbarte Artgenossen sind dann durch Mavirus vor CroV geschützt (3).



KOONIN, E. V., KRUIPOVIC, M.: A PARASITE'S PARASITE SAVES HOST'S NEIGHBOURS. IN: NATURE 540, S. 204-205, 2016, FIG. 1

Partikel auf. Das Riesenvirus aktivierte also seinen kleinen Widersacher, der sich in der Zelle eingenistet hatte. Retten kann das die infizierten Flagellaten allerdings nicht – dafür läuft die Produktion des Mavirus in den Zellen zu spät an. Erst wenn die neu synthetisierten CroV-Partikel schon fast fertig zusammengesetzt sind, kurbelt ein Protein des Riesenvirus die Mavirus-Herstellung an. Der jeweils betroffene Einzeller geht dabei zu Grunde, doch er setzt sowohl CroV- als auch Mavirus-Partikel frei. Und das kommt den anderen *C. roenbergensis* zugute, die als Nächstes attackiert werden.

Mavirus aus zerstörten Flagellaten schützt nämlich deren Artgenossen, die zuvor weder mit Mavirus noch mit CroV in Kontakt gekommen sind, wie die Studien zeigten. Fischer und Hackl isolierten die im vorherigen Experiment von den infizierten Einzellern produzierten Virophagen, mischten sie mit CroV-Partikeln und übertrugen beide in eine Lösung mit gesunden *C. roenbergensis*. Die CroV-Menge war hierbei ausreichend hoch, um zwei Drittel der Flagellaten zu infizieren. Dennoch starben nur relativ wenige davon an der Infektion: Lagen Mavirus und CroV in gleichen Anteilen vor, waren die Einzeller fast vollkommen vor einem tödlichen Befall geschützt. Selbst ein Hundertstel der Mavirus-Menge erhöhte die Überlebenschancen von *C. roenbergensis* deutlich. Der Tod ihrer Artgenossen bewahrte sie also vor der Zerstörung durch die Riesenviren.

Selbstaufopferung zum Wohl der anderen

Eine Zelle opfert sich, um andere zu schützen: Bei mehrzelligen Organismen kommt das ständig vor. Jeden Tag gehen in unserem Körper Millionen Zellen zu Grunde, und wäre das nicht so, wären wir schon längst an Krebs und

anderen Krankheiten gestorben. Es ist jedoch umstritten, inwieweit sich auch Einzeller derart selbstlos verhalten (siehe **Spektrum** Februar 2017, S. 31).

Die Forscher vermuten, dass der Virophage in den Flagellaten die Funktion eines rudimentären Immunsystems ausübt. Wie bei erworbener Immunität »erlernt« die Zelle eine Abwehrreaktion – hier, indem sie ein Provirus in ihre eigene DNA integriert. Eine solche Verteidigung wird erst dann aktiv, wenn infizierende Riesenviren tatsächlich angreifen. Beim Menschen erledigen Immunzellen diese Aufgabe.

DNA-Sequenzen, die entfernt mit Mavirus verwandt sind, haben die Forscher auch im Erbgut einiger mehrzelliger Organismen nachgewiesen. Möglicherweise infizierten die Partikel schon die einzelligen Urahnen von Tieren sowie Pflanzen und schlummern bis heute im Genom von deren Nachfahren. Das menschliche Erbgut besteht sogar zu mehr als acht Prozent aus Sequenzen, die von eingeschleppten Viren stammen. Die meisten davon sind allerdings schon lange nicht mehr in der Lage, eigenständige infektiöse Partikel zu erzeugen. ◀

Michaela Maya-Mrschtik ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

QUELLEN

Fischer, M.G., Hackl, T.: Host Genome Integration and Giant Virus-Induced Reactivation of the Virophage Mavirus. In: Nature 540, S. 288–291, 2016

Fischer, M.G., Suttle, C.A.: A Virophage at the Origin of Large DNA Transposons. In: Science 332, S. 231–234, 2011

La Scola, B. et al.: The Virophage as a Unique Parasite of the Giant Mimivirus. In: Nature 455, S. 100–104, 2008



SPRINGER'S EINWÜRFE DEMOKRATIE MIT ZUSATZJOKER

Meist ist die Gruppe schlauer als der Einzelne, doch manchmal liegt die Mehrheit total daneben. Dann kann ein Trick der Schwarmintelligenz auf die Sprünge helfen.

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

» spektrum.de/artikel/1438954

Da die Völker von einsamen Entscheidern – ob Fürst oder König, Diktator oder Führer – im Lauf der Geschichte wohl genug bekommen haben, gaben sie zunehmend dem Prinzip der Demokratie den Vorzug: Man trifft Beschlüsse gemeinsam, man stimmt (sich) ab. Aber das allein ist noch keine Garantie für perfekt rationales Verhalten der Gemeinschaft. Ist die Klugheit der Gruppe tatsächlich der Kompetenz einzelner Experten überlegen? Was, wenn sich bei demokratischen Abstimmungen bloß das unzureichende Wissen der meisten summiert?

Solche Fragen lassen sich experimentell untersuchen. Angenommen, eine Gruppe von Österreichern soll entscheiden, ob der Satz »Die Hauptstadt von Nordrhein-Westfalen heißt Köln« zutrifft oder nicht. Wahrscheinlich wird die Mehrheit den Satz bejahen, weil Österreicher von der größten Stadt Nordrhein-Westfalens öfter hören als von der tatsächlichen Lan-

Statt: Wie sicher sind Sie sich? fragt man besser: Wie werden die anderen wohl abstimmen?

deshauptstadt Düsseldorf. Also führt die demokratische Abstimmung in diesem Fall in die Irre.

Ein von empirischen Soziologen erprobter Ausweg ist die Zusatzfrage: Wie sicher sind Sie sich Ihrer Entscheidung? Man hofft, dass die Mehrheit ihre tatsächlich irrierte Meinung selbst bezweifelt (»ist nur so ein Gefühl«), während die Minderheit von der Wahrheit der eigenen Aussage felsenfest überzeugt sein kann – sie weiß ja, dass Düsseldorf die Hauptstadt ist.

Solche Zweifel reichen aber nicht aus, um eine Mehrheitsentscheidung eindeutig als falsch zu erkennen. Ist also gegen die Fehlerhaftigkeit demokratischer Prozesse gar kein Kraut gewachsen?

Eine raffiniertere Zusatzfrage hat nun der empirische Wirtschaftsforscher Dražen Prelec vom Massachusetts Institute of Technology zusammen mit zwei Kognitionswissenschaftlern ausprobiert. Statt: Wie sicher sind Sie sich? lautete die Frage: Was werden die anderen wohl sagen? Das heißt, die Forscher veranstalteten eine Befragung über die Befragung, eine Abstimmung zweiter Ordnung. Dann vergleichen sie die beiden Ergebnisse und schließen daraus, ob das eigentliche Votum zutrifft (*Science* 541, S. 532–535, 2017).

Das funktioniert im Beispiel mit Köln als vermeintlicher Hauptstadt so: Die Jasager glauben sich im Recht und geben deshalb bei der Zusatzfrage an, die Abstimmung würde in ihrem Sinn ausgehen. Die Verneiner wissen, dass Düsseldorf die Hauptstadt ist – sie vermuten aber auch, die meisten würden Köln dafür halten; deshalb sagen sie einen Erdrutschsieg der Jasager und eine Niederlage für sich voraus. Entsprechend tippen bei der Zusatzfrage fast alle auf ein viel eindeutigeres Resultat pro Köln, als die eigentliche Abstimmung dann tatsächlich ergibt. Aus dieser Diskrepanz können die Forscher schließen: Das Ergebnis bejaht die falsche Aussage.

Gegenbeispiel: Die meisten Nordrhein-Westfalen wissen, dass Köln nicht ihre Hauptstadt ist. Sie werden entsprechend abstimmen, aber bei der Zusatzfrage einen weniger eindeutigen Ausgang vermuten. Jetzt gibt es keinen Zweifel an dem Abstimmungsresultat, denn es überbietet die Prognose.

Die Forscher haben ihren Ansatz auch anhand der Schätzung moderner Kunstwerke erprobt. Experten bewerteten die Werke tendenziell höher als Laien, doch erst durch die Zusatzfrage näherten sich die Schätzungen den tatsächlich erzielten Auktionspreisen an.

Auf schlaue Weise kombiniert dieses Verfahren Mutmaßungen über das Wissen der Gruppe mit deren tatsächlichem Kenntnisstand. Dabei behält die Weisheit der Gruppe das letzte Wort.



Schwertwale leben in sehr engen Verbänden. Die Klans benutzen unterschiedliche Laute – woran die Tiere sich bei der Paarung wohl orientieren.

An underwater photograph of several orcas (killer whales) swimming in clear blue water. The orcas are black on top and white on the bottom, with characteristic white patches. The water is bright blue, and the surface is visible at the top of the frame with some white foam from waves.

EVOLUTION ORCAS – ARTBILDUNG EINMAL ANDERS

Spaltet sich der Große Schwertwal gerade in mehrere Arten auf? Forscher vermuten das, weil sich einzelne Gruppen weitgehend meiden und ganz verschieden verhalten – teils sogar im selben Lebensraum.

► spektrum.de/artikel/1438957



Rüdiger Riesch ist Dozent für Evolutionsbiologie am Royal Holloway College der University of London. Er hat an der Universität Hamburg Biologie studiert und an der University of Oklahoma promoviert. Als Forscher befasst er sich mit den Hintergründen von Biodiversität und Artentstehung.

Leicht schaukelnd liegt die »Naiad Explorer« an diesem frühen Vormittag vor dem Kieselstrand von Malcolm Island. Wir befinden uns in der Queen Charlotte Strait zwischen Vancouver Island und dem kanadischen Festland. Von dem Walbeobachtungsboot aus schaue ich Cracroft, Plumper und Kaikash zu. Seit beinahe einer Stunde schwimmen die drei Orca-Männchen vor unserem Bug herum und reiben sich dabei behutsam an den kleinen, glatten Steinen vor dem Strand. Die drei Brüder scheinen völlig darin vertieft. Doch bald werden sie wegschwimmen – zur Lachsjagd oder um nach Weibchen Ausschau zu halten.

Warum sich diese Schwertwale an den Steinen schubbern, wissen wir nicht. Vermutlich hilft es, abgestorbene Haut und Parasiten loszuwerden. Vielleicht macht es den Tieren auch einfach Spaß. Bei anderen Walen und selbst bei anderen Orca-Verbänden sehen Forscher Strandschubbern (»beach rubbing«) eher selten. Es gehört aber zum festen Repertoire der »northern residents«, eines Bestands von Orcas, der den Sommer im nördlichen Gebiet um Vancouver Island zu verbringen pflegt.

Der Schwertwal (*Orcinus orca*) – englisch »killer whale«, Mörderwal, genannt – kommt in sämtlichen Weltmeeren vor, von den Tropen bis weit in den Norden und Süden. Und jede seiner diversen Populationen besitzt anscheinend eigene kulturelle Gewohnheiten. Wie wissenschaftliche Studien seit den 1970er Jahren ergaben, umfasst dies praktisch alle Verhaltensbereiche – die Jagd ebenso wie die Kommunikation. Übrigens unterscheiden sich die einzelnen Gruppen auch äußerlich etwas, so in der Fä-

rbung und Zeichnung, Körpergröße und Form der Rückenflosse (siehe »Die Vielfalt der Orcas«, S. 34/35). Zwar sind die Abweichungen im Aussehen nicht so markant wie die im Verhalten, doch genetisch differieren die Populationen nach Untersuchungen der letzten rund 15 Jahre teils erstaunlich stark.

Viele meiner Kollegen und ich glauben daher, dass der Schwertwal keine homogene Art oder Spezies nach klassischer Auffassung bildet. Vielmehr scheint er sich gerade in mehrere Spezies aufzuspalten. Falls dies so weitergeht, könnten einzelne seiner Populationen allmählich zu vollständig getrennten Arten werden. Die wären dann daran erkennbar, dass sie untereinander keine lebens- oder zumindest fortpflanzungsfähigen Nachkommen mehr erzeugen würden.

Ganz besonders fasziniert uns Forscher eines an den Schwertwalen: Als treibende Kraft der Artbildung fungieren bei ihnen womöglich kulturelle Unterschiede. Denn tatsächlich sind Orcas hinsichtlich ihrer Sexualpartner auffallend wählerisch: Sie scheinen sich fast ausschließlich mit Artgenossen einzulassen, die weitgehend die gleichen Gewohnheiten pflegen wie sie selbst. Sollte dieser Verdacht zutreffen, würden uns die Schwertwale einen Mechanismus der Artentstehung vorführen, den die klassische Theorie zur Speziation nicht in Betracht zieht. Nicht zuletzt könnten solche Einsichten Anthropologen sogar besser verstehen lassen, wie es dazu kam, dass die Vorläufer des Menschen und deren Verwandtschaft in derart vielen Linien und Arten auftraten.

Der bekannte Weg der Artbildung:

Eigenständige Entwicklung bei räumlicher Trennung

Mehr als ein Jahrhundert lang haben Biologen die Artbildung hauptsächlich im Zusammenhang mit geografischer Isolation gesehen. Demnach sind physische Barrieren, wie ein Gebirge, eine Wüste oder zumindest ein Fluss, notwendig, damit sich neue Spezies entwickeln können. Evolutionsforscher sprechen hierbei von allopatrischer Artentstehung. Wenn sich also zwei Populationen derselben Art in räumlich getrennten Lebensräumen wiederfinden und sich deshalb nicht mehr miteinander fortpflanzen können, dann werden sie ihre eigenen Evolutionswege einschlagen. Ihre Genpools verändern sich nun unterschiedlich, und sie erwerben andere Umweltanpassungen. Zu ihrer weiteren Entwicklung kann auch eine so genannte genetische Drift beitragen, bei der sich manche Mutationen zufällig – ohne spezielle Einflüsse von außen – durchsetzen. In diesem Szenario kann das Erbgut der beiden Populationen schließlich so weit voneinander abweichen, dass die Individuen gegenseitig kein sexuelles Interesse mehr haben, sollten sie wieder aufeinandertreffen, oder zumindest zusammen keine fruchtbaren Nachkommen mehr hervorbringen können.

Unzählige Beispiele aus der Tierwelt stützen diese klassische Vorstellung. So entstanden manche der nahe verwandten Arten von Pistolen- oder Knallkrebse der Gattung *Alpheus* beidseits des Isthmus von Panama vermutlich infolge der Ausbildung der Landbrücke zwischen Nord- und Südamerika. Und einzelne Spezies von Wüsten-

AUF EINEN BLICK NEUE ARTEN DURCH KULTUR?

- 1 In der klassischen Vorstellung entstehen neue Arten, wenn sich zwei Populationen einer Ausgangsart wegen einer geografischen Barriere nicht mehr begegnen und deswegen anders weiterentwickeln.
- 2 Räumliche Schranken bestehen beim Großen Schwertwal nicht. Trotzdem meiden die verschiedenen Gruppen enge Kontakte mit anderen Populationen. Trennend wirken bei ihnen kulturelle Gewohnheiten.
- 3 Sogar die Lautäußerungen sind verblüffend unterschiedlich – bis in die Familien hinein.

kärpflingen der Gattung *Cyprinodon* leben nur in isolierten Salzwasserquellen Kaliforniens oder Nevadas.

Aber nicht immer erscheint für die Evolution neuer Arten eine geografische Trennung zwingend. Es gibt durchaus Fälle, in denen sich im selben Lebensraum zwei oder mehr Subpopulationen mit unterschiedlichem Erscheinungsbild herausbilden, aus denen getrennte Arten werden können. Dennoch hielten namhafte Evolutionsforscher wie der deutsch-amerikanische Biologe Ernst Mayr (1904–2005) auch für diese Beispiele weiterhin an der These fest, dass zumindest eine vorübergehende räum-

Vielleicht sehen wir bei den Orcas einen Mechanismus der Artbildung, den die klassische Theorie nicht in Betracht zieht

liche Barriere zur Speziation unerlässlich sei. Sie glaubten, falls es Artbildung im selben Gebiet – eine so genannte sympatrische Speziation – überhaupt gäbe, sei das bestimmt äußerst selten.

Neueren Studien zufolge ist eine geografische Isolation allerdings keineswegs immer vonnöten. Als ein Fall sympatrischer Artbildung gelten etwa die beiden verschiedenen Kentia-Palmen der Gattung *Howea*, die nur auf der australischen Lord-Howe-Insel vorkommen und bei uns als Zierpflanzen beliebt sind. Die beiden Spezies, deren Verbreitungsgebiete sich teils überlappen, blühen zu verschiedenen Zeiten. Zu den überzeugendsten Beispielen von Speziation ohne räumliche Barriere zählen die verblüffend artenreichen Buntbarsche oder Cichliden der ostafrikanischen großen Seen und der Kraterseen Nicaraguas, die unter anderem Axel Meyer von der Universität Konstanz erforscht (siehe **Spektrum** April 2014, S. 24). Deren teils sehr schnelle Evolution beruht darauf, dass sie – wohl hauptsächlich mit körperlichen Anpassungen – teils völlig unterschiedliche Nahrungsquellen erschlossen. Für Säugetiere gibt es bislang aber kaum entsprechende Belege. Das macht die Orcas umso interessanter.

Nach dem Menschen ist der Schwertwal das am weitesten verbreitete Säugetier. Dabei vermag ein Orca an einem Tag mehr als 100 Kilometer zurückzulegen, und im Verlauf weniger Wochen können ein paar tausend Kilometer zusammenkommen. Soweit wir wissen, stehen einer Paarung der Mitglieder von Nachbarpopulationen keine geografischen Hindernisse im Weg. Trotzdem geschieht das offensichtlich nicht. Vielmehr verzeichnen die Forscher in vielen Meeresgebieten sogar direkt nebeneinander unterschiedliche Existenzformen oder Ökotypen. Diese leben quasi Seite an Seite, ohne jedoch engeren Kontakt aufzunehmen. Im selben Verbreitungsgebiet frisst der eine Typ beispielsweise am liebsten bestimmte Fische, der andere vor allem Robben und andere Meeressäuger (siehe »A« und »D« oder »B« und »E« in »Die Vielfalt der Orcas«, S. 34/35).

Die gründlichsten Untersuchungen hierüber liegen zu den Schwertwalen des Nordostpazifiks vor. Schon in den frühen 1970er Jahren erkannte der kanadische Meeresbiologe Michael Bigg (1939–1990), dass man Individuen eindeutig anhand ihrer Rückenfinne und dem dahinter befindlichen grau-weißlichen Sattelfleck unterscheiden kann. Wie Bigg dann zusammen mit Kollegen entdeckte – darunter John K. B. Ford und Graeme M. Ellis von der kanadischen Regierungsbehörde DFO (Department of Fisheries and Oceans) sowie Kenneth C. Balcomb III vom Center for Whale Research im US-Bundesstaat Washington –, leben vor der Westküste Kanadas und der USA drei verschiedene Ökotypen nebeneinander.

Die drei Ökotypen vor Westkanada, ihre unterschiedlichen Ortspräferenzen und Ernährungsgewohnheiten

Einen der drei Ökotypen nannten die Forscher »residents«, die »Ansässigen«: Diese Individuen sind über größere Zeiträume recht ortsfest und auf Fische spezialisiert; bevorzugt erbeuten sie Lachse. Die »transients« (die »Durchreisenden« oder »Nomaden«) fressen dagegen hauptsächlich andere Meeressäuger, also Robben und andere Wale, sowie gelegentlich Seevögel. Die »offshores« bilden die dritte Fraktion. Sie halten sich meist von der Küste fern und ernähren sich wohl ebenfalls gern von Fischen, allerdings etwa von Pazifischem Heilbutt, der mehr als zwei Meter groß werden kann, und vom bis zu gut vier Meter langen Pazifischen Schlafhai. Von diesem küstenscheuen Ökotyp wissen die Forscher nur wenig, denn sie bekommen ihn nur selten zu Gesicht.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

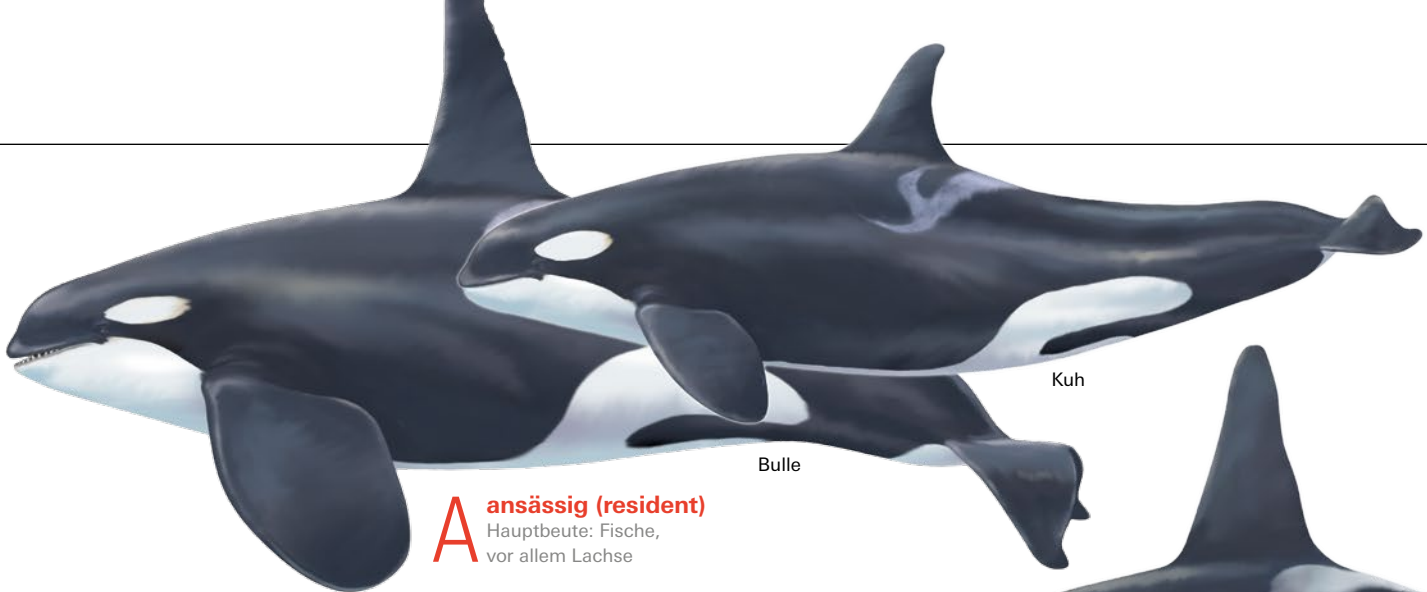
Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/evolution



FOTOLIA / HL PHOTO

Unterschiede ähnlich wie die zwischen den ortsbeständigen und den nomadischen nordostpazifischen Orcas fanden andere Forscherteams in den vergangenen Jahren auch bei den Orcas im russischen Nordwestpazifik rund um die Halbinsel Kamtschatka. Jene Studien leiteten Olga A. Filatova von der Lomonossow-Universität Moskau, Alexander M. Burdin von der Russischen Akademie der Wissenschaften sowie Erich Hoyt von Whale and Dolphin Conservation in England. Demnach erstrecken sich Populationen von »ortsfesten« Schwertwalen mehr oder weniger kontinuierlich von Nordamerika über die Aleuten bis nach Russland; Gleiches gilt für nomadische Gruppen.

Die Schwertwale im nordöstlichen Atlantik – bei Island, den Shetland-Inseln und Norwegen – haben hingegen ihre eigenen Nahrungspräferenzen, wie unter anderem Forscher um Volker B. Deecke von der University of Cumbria



Kuh

Bulle

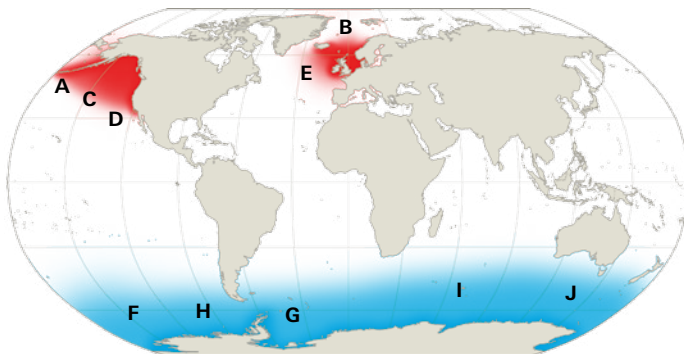
A ansässig (resident)
Hauptbeute: Fische,
vor allem Lachse

Die Vielfalt der Orcas

Der weltweit verbreitete Große Schwertwal (*Orcinus orca*) bildet eine Anzahl von Ökotypen (Buchstaben in der Karte), die sich im Aussehen und mehr noch im Verhalten deutlich unterscheiden. Teils leben sogar in derselben Region mehrere verschiedene Ökotypen nebeneinander, ohne sich jedoch miteinander zu paaren. Trennend wirken anscheinend hauptsächlich die spezifischen kulturellen Muster, etwa die Jagdstrategien, Beutepreferenzen und Kommunikationsweisen.



B Typ 1
Hauptbeute:
Heringe und Makrelen



Südhalbkugel

Mindestens fünf verschiedene mutmaßliche Ökotypen (F bis J) mit eigenen Jagdstrategien und Nahrungspräferenzen scheinen rund um die Antarktis vorzukommen. DNA-Daten zufolge könnten sich die Unterschiede herausgebildet haben, während die Populationen bereits in der Region zusammenlebten.

* gelbe Verfärbung bei Typ B und C durch Algen



F Typ B (Packeisform)*
Hauptbeute:
Robben

H Typ A
Hauptbeute:
Antarktische Zwergwale

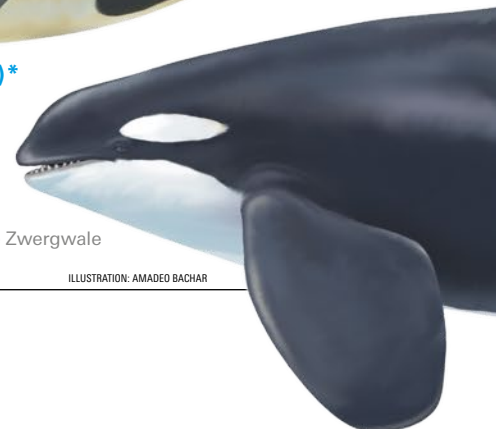


ILLUSTRATION: AMADEO BACHAR

Nordhalbkugel

Von der Nordhalbkugel kennt man bislang fünf Ökotypen (A bis E), drei vom Pazifik, zwei vom Atlantik. Jeder von ihnen hat besondere Jagdgewohnheiten, die im Sozialverband tradiert werden. Ob sich diese teils gemeinsam auftretenden Ökotypen zunächst unter räumlicher Trennung auszudifferenzieren begannen oder sich schon ihre Vorläufer denselben Lebensraum teilten, ist noch unklar.

C küstenfern (offshore)
bekannte Beute: Pazifischer Heilbutt, Pazifischer Schlafhai

D nomadisch (transient)
Hauptbeute: Robben und andere Wale

E Typ 2
Hauptbeute: Robben

G Typ B (Gerlache-Form)*
Hauptbeute: Pinguine

Typ D
bekannte Beute: Schwarze Seehechte

J Typ C*
Hauptbeute: Antarktische Seehechte

ILLUSTRATION: AMADEO BACHAR

(England) und Andrew D. Foote, heute an der Bangor University (Wales), aufzeigten. Sie stellten zwei mutmaßliche Ökotypen fest: Populationen des Typs 1 erbeuten gern Fische, insbesondere Heringe und Makrelen; jene des Typs 2 sind auf Robben spezialisiert. Genauerer Abschluss über diese Unterschiede im Beuteschema müssen allerdings erst weitere Untersuchungen bringen.

Für die südlichen Ozeane gilt im Prinzip Ähnliches. John W. Durban und Robert L. Pitman von der NOAA, der Wetter und Ozeanografiebehörde der USA, entdeckten mit ihren Mitarbeitern in antarktischen und subantarktischen Gewässern wenigstens vier verschiedene, sich geografisch überlappende Ökotypen, Typ A bis D genannt. Die Typ-A-Orcas scheinen speziell Antarktische Zwergwale zu erbeuten, die immerhin bis zu zehn Meter messen können. Beim Typ B lassen sich sogar nochmals zwei Formen unterscheiden: eine große Packeisform, die Robben von Eisschollen herunterspült; und eine kleinere Gerlache-Form, benannt nach der Gerlache-Straße bei der Antarktischen Halbinsel, die am liebsten Pinguine frisst. Der Typ C, der kleinste bisher bekannte Schwertwal überhaupt, macht auf Antarktische Seehechte Jagd. Vom Typ D ist wenig bekannt. Er scheint wie die Offshore-Orcas im Nordpazifik fern der Küsten zu leben, stiehlt gern Schwarze Seehechte von Langleinen, hat aber vermutlich eine größere Speisekarte.

Wie mögen all jene Ökotypen entstanden sein? Lebten die Ausgangspopulationen, aus denen sie hervorgingen, zu Beginn ihrer Differenzierung bereits im selben Gebiet? Immerhin wäre es denkbar, dass sie ursprünglich getrennte Lebensräume innehatten und erst später die gleichen Regionen besiedelten, als die Unterschiede zwischen ihnen schon relativ ausgeprägt waren.

Für die Orcas der Nordhalbkugel sind die betreffenden Daten vorerst nicht eindeutig. Einerseits sprechen Studien von Foote und seinen Kollegen eher dafür, dass die eigen-

Lebten schon die Ausgangspopulationen, aus denen die heutigen Ökotypen hervorgingen, im selben Gebiet wie diese jetzt?

ständigen Entwicklungen der einzelnen Ökotypen räumlich getrennt abliefen. Andererseits erhielten Alan Rus Hoelzel von der Durham University (England) und seine Kollegen Hinweise, wonach auch schon die Vorläufer der jetzigen Ökotypen während der Auseinanderentwicklung nebeneinander in denselben Regionen lebten.

Für die Antarktische Gebiete erscheinen die Daten klarer. Die meisten, wenn nicht sogar alle dortigen Ökotypen bildeten sich demzufolge vermutlich heraus, als die betreffenden Gruppen dort bereits zusammen vorkamen.

Fest steht allerdings, dass all diese Entwicklungen nach Evolutionsmaßstäben rasch vonstattengegangen sein müssen. Nach einer Genomanalyse von fünf Orca-Ökotypen aus dem Nordpazifik und aus der Antarktis, die

das Team um Foote im Mai 2016 vorlegte, lebte der gemeinsame Vorfahr sämtlicher Populationen vor höchstens 250 000 Jahren.

Die große Frage ist nun, wieso sich die heutigen Ökotypen in der Natur anscheinend praktisch nicht mehr vermischen. Die Meeres-Freizeitparks von SeaWorld halten schon seit mehreren Jahrzehnten auch Schwertwale. Manche der Tiere stammen aus dem Nordatlantik, andere aus dem Nordpazifik. Nach Angaben der Betreiber sind Kälber von gemischten Paarungen lebens- und als Erwachsene fortpflanzungsfähig. Höchstwahrscheinlich sind die Ökotypen untereinander also nicht genetisch unverträglich. Deswegen fällt der Verdacht nun auf die kulturellen Unterschiede zwischen den Gruppen, denn in letzter Zeit mehren sich Hinweise darauf, dass differierende Verhaltensmuster für die selektiven Paarungen verantwortlich sind.

Die Art der Nahrungsbeschaffung wird kulturell tradiert – sogar unter Erwachsenen

Organismen, die sich in neue, getrennte Arten aufspalten, passen sich dabei oft an unterschiedliche Nahrung an. Auch die einzelnen Schwertwalgruppen haben sich auf verschiedene Ernährungsgewohnheiten eingestellt. Das betrifft zum einen körperliche Eigenschaften. So sind Orca-Ökotypen, die andere Meeressäuger erlegen, in der Regel größer und auch kräftiger gebaut als etwa solche, die gern Fische jagen. Noch auffälliger sind allerdings die Verhaltensspezialisierungen rund um die Nahrungsbeschaffung. Wir Forscher halten diese Verhaltensweisen für kulturell bedingt, weil sie so nur in bestimmten Populationen auftreten und überdies offenbar untereinander mittels Sozialkontakten weitergegeben werden, und zwar sowohl an die nächste als auch innerhalb derselben Generation. Damit dürfte dies kein angeborenes, genetisch vererbtes Verhalten darstellen, sondern ein tradiertes, das auf sozialem Lernen beruht.

Beispielsweise überwältigen bestimmte Schwertwale junge, unerfahrene Seelöwen und Seeelefanten trickreich am Strand. Diese Jagdstrategie, bei der die Wale plötzlich in der Brandung auftauchen und sich mit den anlandenden Wellen weit ins Flache vorwagen, ja bei der sie vorübergehend regelrecht stranden, kennen Forscher von zwei noch nicht erwähnten Orca-Beständen. Die eine lebt im Indischen Ozean bei den Crozet-Inseln zwischen Madagaskar und der Antarktis, die andere bei der Halbinsel Valdés an der argentinischen Atlantikküste. Allem Anschein nach haben sich die beiden Populationen ihre jeweiligen Strategien unabhängig voneinander angeeignet. Denn diese sind gut auf die Beutesorte und die lokalen Gegebenheiten zugeschnitten. In beiden Regionen gibt es tiefe Kanäle und Flussmündungen, wodurch die Wale ungesehen bis dicht ans Ufer kommen können.

In der Antarktis benutzen die großen Packeis-Orcas vom Typ B eine geradezu geniale Technik zum Robbenfang. Auf Englisch sagen die Forscher dazu »wave washing«. Die Robben liegen gern auf kleinen Eisschollen, wo sie sich offenbar sicher fühlen. Doch wenn Schwertwale so ein Tier erspähen, erzeugen sie durch koordinier-



NATIONAL GEOGRAPHIC CREATIVE / IRRIDA MITAKUCHI

Eine Orca-Familie vor British-Kolumbien (Westkanada). Forscher erkennen die Individuen unter anderem an der Größe und Form ihrer Finne, dem »Schwert«. Das der Bullen (die beiden Tiere hinten) ist riesig – bis zu zwei Meter hoch – und meist fast dreieckig, das der Kühe kleiner und leicht krumm.

tes Schwimmen direkt unter der Wasseroberfläche derart starke Wellen, dass die Eisinsel ins Schwanken gerät, dabei kräftig überspült wird und das Opfer ins Wasser rutscht.

Eine wiederum völlig andere Strategie verfolgen die Fische fressenden Typ-1-Wale bei Island und Norwegen mit ihrem raffinierten Fresskarussell (»carousel feeding«). Zu ihrer Hauptnahrung zählen Heringe. Im Trupp umzingeln sie einen Schwarm regelrecht von allen Seiten und drängen die Fische zu einem dichten Haufen nahe der Wasseroberfläche zusammen, so dass diese nicht nach unten entkommen können. Dann schwimmen einzelne Wale mitten ins Gedränge hinein und setzen die Beute mit Schlägen der Fluke (Schwanzflosse) außer Gefecht.

An die Jagdstrategie angepasste Lautgebung: Wenn Schwertwale auf Robbenfang schweigsam werden

Hochinteressant sind ganz besonders die kulturellen Muster der akustischen Kommunikation von Schwertwalen. Wie andere Delphine (zu denen auch die Orcas gehören) verwenden sie drei verschiedene Kategorien von Lautäußerungen. Zur Echoortung produzieren sie Klicks, mit denen sie sich orientieren und Beute aufspüren. Untereinander kommunizieren sie mit gepulsten Rufen und Pfiffen, die sich nicht nur von Region zu Region unter-

scheiden, sondern auch von Ökotyp zu Ökotyp, sogar wenn diese Ökotypen in derselben Region leben. Und selbst wie oft und intensiv die Tiere Laut geben, ist gruppenspezifisch verschieden.

Letzteres dürfte eng mit der jeweiligen Beutesorte zusammenhängen. Denn Orcas, die Meeressäuger jagen, also andere Wale oder Robben, müssen damit zurechtkommen, dass diese über ein vorzügliches Gehör verfügen, das ihnen gerade auch im Wasser bestens dient. Solche Beutetiere würden die herannahende Gefahr an ausgetauschten Rufen und Pfiffen sowie Echoklicks ihrer Feinde frühzeitig erkennen und sich schleunigst davonmachen. Das berücksichtigen Schwertwale offensichtlich. So sind der nomadische, auf Säuger spezialisierte Ökotyp im Nordpazifik und der Säugetiere fressende »Typ 2« im Nordatlantik mit Lautgebung höchst sparsam. Die meiste Zeit verhalten beide sich sogar ganz still, machen sich beim Schwimmen oder Jagen somit akustisch unsichtbar. Verglichen damit wirken Fische erbeutende Orcas richtig geschwätzig und lärmig. Typischerweise haben sie sich andauernd etwas mitzuteilen, und auch von der Echoortung machen sie ausgiebig Gebrauch, wenn sie herumswimmen oder Beute verfolgen.

Viele der Rufe und, wie ich zeigen konnte, ebenso manche der Pfiffe können wir Forscher deutlich unter-

scheiden und einzelnen Gruppen zuordnen – somit als distinkte, sozusagen stereotype, feste Laute einer Population oder eines Ökotyps erkennen. Die einzelnen festen Laute scheinen kontextgebunden aufzutreten. Es gibt jedoch keinerlei Anzeichen dafür, dass dies inhaltlich etwas mit Wörtern oder Sätzen zu tun hat, das heißt mit Sprache im menschlichen Sinn.

Aber nicht nur zwischen den geografischen Regionen sowie den Ökotypen desselben Gebiets unterscheiden sich die Laute. Noch bemerkenswerter erscheinen die Abweichungen zwischen den Sozialverbänden von ein- und

Ihre Paarungspartner wählen sie bevorzugt aus anders klingenden akustischen Klans ihres eigenen Ökotyps

demselben Ökotyp. Bei den Fische fressenden, nördlichen »residents« etwa, die von Vancouver Island bis Südostalaska auftreten, benutzt jede Familiengruppe ihr eigenes Lautrepertoire aus 7 bis zu 17 distinkten Rufen. Darunter gibt es Familien, deren Rufrepertoire sich in Teilen überschneidet. Die Forscher fassen diese dann zu akustischen Klans zusammen und unterscheiden beispielsweise bei den nördlichen »residents« die Klans A, G und R.

Allein anhand von Aufzeichnungen ihres Lautrepertoires können wir sogar Individuen dem richtigen Ökotyp zuordnen sowie einem akustischen Klan und sogar einem Familienverband. Es scheint sehr wahrscheinlich, dass diese Dialekte innerhalb der Ökotypen vor Kanada bei der Partnerwahl eine wichtige Rolle spielen. Denn gemäß genetischen Analysen der nördlichen »residents«, die Lance Barrett-Lennard vom Vancouver Aquarium Marine Science Centre durchführte, gleichen sich Tiere, deren Lautgebung sich größtenteils ähnelt, auch genetisch. Ihre Paarungspartner wählen sie bevorzugt von anders klingenden Klans ihres Ökotyps, mit denen sie weniger nah verwandt sind. Solches Verhalten könnte Inzucht verhindern.

Neue Erklärungsmuster für den Fortgang der menschlichen Evolution?

Was bedeuten diese vielen Befunde für die Artsituation des Schwertwals? Halten ihre unterschiedlichen kulturellen Gepflogenheiten die Ökotypen auseinander, und das im selben Verbreitungsgebiet? Ist somit Kultur in ihrem Fall das entscheidende trennende Element, das schließlich sogar zu neuen Arten führen könnte?

Nach den bisherigen Beobachtungen möchte man das annehmen, denn offenbar meiden die verschiedenen Ökotypen der Orcas soziale Kontakte zueinander und paaren sich nicht, obwohl gemeinsamer Nachwuchs biologisch gesehen möglich wäre. Man kann sich gut vorstellen, dass diese kulturelle Absonderung das Erbgut der Gruppen im Lauf der Generationen immer unterschiedlicher werden lässt, bis es irgendwann nicht mehr zuei-

einanderpasst. In so einem Szenario hätte Kultur durchaus das Potenzial, als Evolutionsbarriere an die Stelle einer räumlichen Trennung zu treten. Kulturelle Gewohnheiten könnten eine Artneubildung begünstigen, indem sie verhindern, dass sich die Populationen vermischen.

Auch auf die menschliche Evolution sowie auf die Entstehung unserer heutigen Vielfalt werfen die Erkenntnisse aus der Schwertwalforschung womöglich ein neues Licht. Laut traditioneller Auffassung kamen die meisten Selektionsdrücke in unserer Vergangenheit rein durch Umweltveränderungen zu Stande. Doch zumindest unsere jüngste Evolution basierte nach neueren genetischen Studien vielleicht zu einem Großteil auf teils sehr kleinräumigen kulturellen Innovationen. Forscher sprechen von Gen-Kultur-Koevolution. Rinderhaltung etwa rief in einigen Populationen Afrikas und Europas unabhängig voneinander eine genetisch bedingte Toleranz für Milchzucker (Laktose) bei Erwachsenen hervor. Und die Inuit Grönlands erwarben in ihrer evolutiven Vergangenheit durch ihre fettreiche Ernährung einen effizienteren Fettstoffwechsel.

Dennoch zählen alle Populationen des modernen Menschen eindeutig zu einer Art, *Homo sapiens*. In früheren Zeiten lebten allerdings meist mehrere Hominiden-, auch Menschenarten gleichzeitig. Vielleicht war Kultur ja bei deren Evolution eine wesentliche treibende Kraft (siehe **Spektrum** Juni 2016, S. 48 und **Spektrum** Spezial BMH 4/2015).

Im Ganzen gesehen sind unsere Kenntnisse über den Schwertwal trotz allem noch gering. Viele seiner Populationen sind bisher wenig erforscht, so dass wir nicht wissen, ob sich die hier geschilderten Befunde verallgemeinern lassen. Zumindest für die Meere bei Afrika weisen vorläufige Daten allerdings darauf hin, dass dort ebenfalls verschiedene Ökotypen nebeneinander existieren könnten. Gilt Ähnliches für Südamerika und Südasien? Spannend wären außerdem Untersuchungen über die Kommunikationssysteme und Sozialstrukturen der Orcas der Antarktis und Subantarktis. Zu Artbildungsprozessen – nicht nur bei den Orcas – versprechen die immer besseren genetischen Methoden Aufschluss. Damit hoffen wir Herkunft und Verwandtschaftsverhältnisse der heutigen Populationen und Ökotypen zu klären.

Denkbar ist sogar, dass Biologen in der gleichen Region lebende Orca-Ökotypen in ein paar Jahren anhand neuer Befunde als unterschiedliche Arten bezeichnen werden. Mit ihren Ernährungstraditionen, ihren Lautäußerungen und ihrem exklusiven Paarungsverhalten erfüllen die Schwertwale einige wesentliche äußere Voraussetzungen dafür schon jetzt. ◀

QUELLEN

Morin, P.A. et al.: Geographic and Temporal Dynamics of a Global Radiation and Diversification in the Killer Whale. In: *Molecular Ecology* 24, S. 3964–3979, 2015

Moura, A.E. et al.: Phylogenomics of the Killer Whale Indicates Ecotype Divergence in Sympatry. In: *Heredity* 114, S. 48–55, 2015

Riesch, R. et al.: Cultural Traditions and the Evolution of Reproductive Isolation: Ecological Speciation in Killer Whales? In: *Biological Journal of the Linnean Society* 106, S. 1–17, 2012

Spektrum gibt es auch digital.



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

Bestellen Sie jetzt Ihr Digitalabo!

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

www.spektrum.de/digitalabo



KEIMBAHNTHERAPIE MENSCHENDESIGN DURCH DIE HINTERTÜR

SERIE: DIE ZUKUNFT DER MENSCHHEIT Mediziner wollen männliche Unfruchtbarkeit therapieren, indem sie Spermienzellen genetisch verändern. Doch damit würden sie ethisch betrachtet eine rote Linie überschreiten. Denn die Modifikationen verblieben in der Keimbahn und würden auf diese Weise weitervererbt.



Stephen S. Hall ist preisgekrönter Wissenschaftsautor und lehrt Wissenschaftskommunikation an der New York University.

► spektrum.de/artikel/1438955

► Kyle Orwig würde nur zu gern ein Experiment machen, das einige Leute ungeheuer aufregen dürfte. Der Professor an der University of Pittsburgh und Experte für die Biologie von Spermien interessiert sich insbesondere dafür, wie spezialisierte Stammzellen in den Hoden die Samenzellen erzeugen. Hin und wieder verhindert ein genetischer Defekt, dass dieser Vorgang zu Ende läuft, was den betreffenden Mann unfruchtbar macht. In dem Experiment, das Orwig vorschwebt, würde er den Defekt in den Spermien bildenden Stammzellen von Mäusen durch »Gen-Editing« – kontrolliertes Verändern von Erbfaktoren – beheben und die so behandelten Zellen unfruchtbaren Tieren wieder einpflanzen. Damit hätte er eine potenzielle Behandlungsmethode für männliche Sterilität aufgezeigt.

Nach Orwigs Ansicht wäre das Ganze nicht besonders schwierig umzusetzen, schließlich macht er ähnliche Transplantationsexperimente schon seit 20 Jahren. Die Folgen aber könnten gewaltig sein. Experimente, wie Orwig sie sich vorstellt, würden sich einer roten Linie in der biologischen Forschung nähern: Sie bahnen den Weg zu dauerhaften Veränderungen des genetischen Texts der Spezies Mensch, die an zukünftige Generationen weitergegeben werden.

Stellte sich eine solche Keimbahnmodifikation als ungefährlich, wirksam und ethisch hinnehmbar heraus, könnten Wissenschaftler beispielsweise bestimmte Krankheitsanfälligkeiten aus unserer DNA beseitigen – aber auch versuchen, den *Homo sapiens* genetisch zu optimie-

SERIE

Die Zukunft der Menschheit

- Teil 1: Januar 2017
Eine vielschichtige Angelegenheit
von Jan Zalasiewicz
- Teil 2: Februar 2017
Der Methusalem-Effekt
von Bill Gifford
- Teil 3: März 2017
Reiche Welt – arme Welt
von Mara Hvistendahl
- Teil 4: April 2017**
Menschendesign durch die Hintertür
von Stephen S. Hall
- Teil 5: Mai 2017
Gespaltene Gesellschaft
von Angus Deaton
- Teil 6: Juni 2017
Der unsterbliche Mensch
von Hillary Rosner
- Apokalypse oder Aufbruch?**
von David Grinspoon

Rasterelektronenmikroskopische, nachträglich eingefärbte Aufnahme von menschlichen Spermienzellen. Im Kopf der Zelle befindet sich die DNA, der lange, peitschenförmige Schwanz treibt sie voran.



ren. Der Gedanke weckt düstere Erinnerungen an die Eugenikbewegung des frühen 20. Jahrhunderts, die im Nazideutschland ihren schrecklichen Höhepunkt fand.

Orwig legt es nicht darauf an, ethische Grenzen zu überschreiten. Dennoch ist er so etwas wie ein Provokateur. Mit dem Nachweis, dass sich Unfruchtbarkeit bei Mäusen mit geringfügigen genetischen Veränderungen heilen lässt, möchte er demonstrieren, dass die vererbare Modifikation menschlicher Gene keine abstrakte Herausforderung in ferner Zukunft ist, sondern schon sehr bald medizinische Bedeutung erlangen kann.

Die Frage der Keimbahnveränderung ist in den letzten Jahren so akut geworden, weil ein neues, leistungsfähiges genetisches Hilfsmittel namens CRISPR/Cas9 es ermöglicht, die DNA-Sequenz jedes Lebewesens – auch des Menschen – mit nie da gewesener Präzision und Leichtigkeit abzuwandeln. Im April 2015 berichteten chinesische Wissenschaftler über den ersten Versuch, damit die Gene menschlicher Embryonen zu verändern, was für Aufruhr sorgte. Die Schlagzeilen der Medienberichte dazu offenbarten das verbreitete gesellschaftliche Unbehagen über die Experimente und weckten Ängste, sie könnten zu Designerbabys und genetischer Aufrüstung führen.

Im Vergleich dazu stellt die bescheidene Samenzelle ein viel weniger umstrittenes Ziel dar. Und da die Veränderung des Erbguts in einem Embryo technisch nach wie vor schwierig ist, meinen viele Experten, dass man sich der Keimbahnmodifikation wohl leichter und risikoärmer in einem früheren Stadium nähern kann: bereits bei den Keimzellen, die sich erst danach zur Zygote vereinigen. Aber auch dann beeinflusst man schon das menschliche Genom auf Dauer, denn alle Änderungen bleiben in den aus den Keimzellen entstandenen Embryonen erhalten.

Orwig gehört zu den wenigen Biologen, die Erfahrung mit dem Abwandeln und Verpflanzen von Spermatogonien haben – jenen Stammzellen, aus denen die Samenzellen hervorgehen. Hätte er Erfolg, wäre das nicht nur für Betroffene interessant, sondern auch für die In-vitro-Fertilisationsbranche (IVF), die 2015 allein in den USA einen

geschätzten Umsatz von zwei Milliarden Dollar und weltweit sogar rund das Zehnfache erzielte.

Die aktuelle Debatte um die Keimbahnmodifikation mag manchen irgendwie bekannt vorkommen. Anfang der 1970er Jahre entdeckten Biologen, wie man DNA mit Enzymen aus Bakterien zerschneiden und wieder zusammenfügen kann. Dieser DNA-Rekombination genannte Durchbruch weckte Befürchtungen, gefährliche gentechnisch veränderte Mikroorganismen könnten aus den Labors entkommen. Die Konsequenz war 1974 ein beispielloses, freiwilliges Moratorium.

1975 kam es dann zu einer historischen Wissenschaftlerkonferenz im kalifornischen Asilomar. Dort diskutierten angesehene Molekularbiologen wie David Baltimore, der damals am Massachusetts Institute of Technology arbeitete, über die Sicherheit der neuen Methode, und das führte zu staatlichen Richtlinien für die gentechnische Forschung. In der Folge entwickelte sich die Biotechnologie zu einer Branche, die das späte 20. Jahrhundert entscheidend prägte.

Fernsehteam verfolgt die Mochtgerkloner bis auf die Toilette

Die Öffentlichkeit begrüßte zwar 1974 die Entscheidung der Wissenschaftlergemeinschaft, inmitten einer hektisch voranstürzenden Forschungsphase eine Auszeit zu nehmen, aber viele Experten hielten das für eine Überreaktion auf rein hypothetische Sicherheitsbedenken. So sprach James D. Watson, der Mitentdecker der Doppelhelixstruktur der DNA, von »sinnloser Hysterie«.

Seit der Asilomar-Konferenz haben umstrittene biologische Forschungsarbeiten häufig großen Aufruhr in der Öffentlichkeit verursacht, worauf aufwändige Tagungen folgten, oft allerdings mit irritierenden Begleiterscheinungen. Eine Konferenz über das Klonen von Menschen wurde 2001 zu einem Medienzirkus: Außenseiter unter den Reproduktionsmedizinern schworen, sie würden Menschenbabys klonen; Fernsehteam verfolgte die Mochtgerkloner überall hin – bis auf die Toilette. Im selben Jahr verkündete das Magazin »Wired« gar auf seiner Titelseite: »Irgendjemand wird in den nächsten zwölf Monaten einen Menschen klonen.«

Dieses Mal herrschen unter Wissenschaftlern zwar spürbar ungute Gefühle, aber gleichzeitig argwöhnen sie, ein weiteres selbst auferlegtes Moratorium könne den Fortschritt zu sehr hemmen. Die Folge? Wieder eine Tagung. Im Dezember 2015 veranstalteten die National Academy of Sciences und die National Academy of Medicine gemeinsam in Washington ein internationales »Gipfeltreffen« mit der Royal Society aus Großbritannien und der chinesischen Wissenschaftsakademie.

Baltimore räumte dabei ein, die Veränderung des menschlichen Erbguts sei deshalb »undenkbar« geblieben, weil die ersten Generationen gentechnischer Hilfsmittel schwerfällig und ineffizient gewesen seien. »Aber im Lauf der Jahre ist das Undenkbare vorstellbar geworden, und heute haben wir das Gefühl, dass wir kurz davor stehen, in die Vererbung der Menschen eingreifen zu können«, sagte er. Die übergeordnete Frage, so Baltimore

AUF EINEN BLICK GENETISCHER RUBIKON

- 1** Mit neuen biotechnischen Verfahren lässt sich schon bald der genetische Kode von Samenzellen verändern, um männliche Unfruchtbarkeit zu behandeln.
- 2** Solche Genomveränderungen würden an zukünftige Generationen weitergegeben. Damit wäre eine genetische Keimbahntherapie eingeführt – und ethisch wie juristisch betrachtet eine rote Linie überschritten.
- 3** Viele Wissenschaftler beschwichtigen mit dem Argument, die Technik sei noch nicht ausgereift. Andere glauben jedoch, dass diese Entwicklung schon bald bevorsteht und unvermeidlich ist.

Die Gene menschlicher Embryonen zu verändern, ist sehr schwierig. Samenzellen dürften ein leichteres Ziel für Keimbahnmodifikationen darstellen.



GETTY IMAGES/NEIL HARDING

weiter, lautet: »Wollen wir als Gesellschaft diese Fähigkeit nutzen, und wenn ja, wie?«

Die Antwort schien für alle, die wie ich die ganze dreitägige Konferenz miterlebten, einhellig zu lauten: Wir sind uns nicht sicher, aber wir haben auch noch viel Zeit, in Ruhe darüber nachzudenken. Zahlreiche Vorträge, unter anderem des Genomforschers Eric Lander vom Broad Institute des MIT und der Harvard University, wiesen nachdrücklich auf die technischen Hürden hin sowie auf die fehlende medizinische Notwendigkeit von Keimbahnmodifikationen beim Menschen zumindest für die absehbare Zukunft.

Ein Moratorium nach dem Vorbild von Asilomar haben die Organisatoren geschickt umschifft. Baltimore verlas eine sorgfältig formulierte Mitteilung der Tagungsorganisatoren, laut der es »unverantwortlich« sei, derzeit aus klinischen Gründen in die menschliche Keimbahn einzugreifen. Am Ende des Gipfeltreffens erklärte er, die Organisatoren hätten bewusst darauf verzichtet, ein Verbot oder einen Aufschub zu fordern. Die Grundlagenforschung könne und solle ungehindert fortgesetzt werden, aber die Öffentlichkeit brauche sich keine Sorgen über unmittelbar bevorstehende Entwicklungen zu machen: Solche Eingriffe an Menschen wären unnötig, unklug und sicher nicht in nächster Zukunft zu erwarten.

So sehen es allerdings nicht alle Wissenschaftler. Die Organisatoren der Tagung in Washington präsentierten das Thema mit den Worten »wann, wenn überhaupt«. Aber wenn man in privaten Gesprächen mit Biologen nach den Aussichten menschlicher Keimbahnveränderung fragt, hört man häufig ein anderes Wort: »unausweichlich«.

In den Augen mancher Forscher wie des Biologen George Church von der Harvard Medical School war die Konferenz von Washington ein Versuch, den Status quo zu erhalten. »Im Grunde wollen sie die Öffentlichkeit beruhigen«, sagt Church. »Das war ihr Ziel, egal was gesagt wurde. Ich will zwar ebenfalls niemand aufwiegeln, aber auch nicht einfach ruhigstellen. Ich will, dass Klarheit darüber herrscht, wohin die Sache läuft.« Und die Öffentlichkeit, so Church, muss jetzt anfangen, über Genmodifikationen beim Menschen nachzudenken, denn der wissenschaftliche Fortschritt stößt bereits an diese rote Linie.

Church und andere sind überzeugt: Zwar reguliert eine Fülle internationaler Vorschriften die Forschung an menschlichen Embryonen, aber die genetische Veränderung von Keimzellen im Reagenzglas (fachlich In-vitro-Gametogenese, IVG) hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Und das, ohne der gleichen peniblen Prüfung in der Öffentlichkeit unterzogen zu werden oder ähnliche ethische Bedenken auszulösen wie die Genmanipulation an Embryonen.

»Technologisch gesehen ist alles startklar«, sagt der Bioethiker I. Glenn Cohen von der Harvard Law School. Ina Dobrinski, eine Expertin für Reproduktionsbiologie an der University of Calgary, die sich mit der Genmanipulation an Schweinen und anderen großen Tieren beschäftigt, fügt hinzu: »Theoretisch können wir es. In der Praxis traut sich wegen der ethischen Fragen niemand heran.«

»Masturbation gilt nicht als Völkermord«

Angenommen, die Keimbahnveränderung wäre trotz aller Bedenken und gesetzlicher Verbote in vielen Ländern wirklich unausweichlich – wie könnte sie dann konkret ablaufen? Nach Churchs Ansicht wird der Keimbahn-Rubikon bei den zahlreichsten und damit entbehrlichsten Zellen des menschlichen Organismus, den Spermien, überschritten werden, weil diese nicht die gleichen ethischen Bedenken und Emotionen hervorrufen wie Embryonen oder auch Eizellen. Der gleichen Ansicht ist Bioethiker Cohen: »Masturbation gilt nicht als Völkermord.«

Church glaubt auch, dass nicht CRISPR als solches, sondern ganz allgemein die Gentherapie die Voraussetzungen für den folgenschweren Wandel schaffen wird, da diese schon akzeptiert ist. Die US-Regulationsbehörde FDA hat bereits Dutzende entsprechender klinischer Studien zugelassen, allerdings nur für somatische Zellen – das heißt solche, die nicht zur Keimbahn gehören. »Gentherapie wird heute bei Kleinkindern angewendet und zukünftig bei immer noch jüngeren stattfinden«, sagt er. Einen sehr öffentlichkeitswirksamen Fall gab es zum Beispiel Ende 2015 in Großbritannien: Wissenschaftler hatten gentechnisch die Immunzellen eines Babys verändert, um damit dessen Leukämieerkrankung zu bekämpfen.

Samenzellen genetisch zu verändern, erklärt Church, wird Paaren die Belastung ersparen, dass nach einer

In-vitro-Fertilisation solche Embryonen abgetötet werden, die beim obligatorischen Screening vor der Einnistung genetische Risikofaktoren für verheerende Krankheiten zeigen. »Ich denke, die genetische Manipulation von Samenzellen würde niemanden besonders stören«, sagt er. »Dabei sterben schließlich keine Embryonen.«

Zwei naheliegende Ziele, so fügt Church hinzu, wären einerseits verschiedene durch ein einzelnes Gen verursachte Erkrankungen wie die Tay-Sachs-Krankheit und andererseits eben die männliche Unfruchtbarkeit. »Ich glaube, dass es schon bald mehrere klinische Behandlungsmethoden mittels Gentherapie gegen Unfruchtbarkeit geben wird«, prophezeit Church. Wie bald? »In den nächsten paar Jahren. Es wäre sehr schwer, da zu widerstehen.«

So genannte Nacktmäuse ähneln einem Hodensack mit Augen und Füßen

Der Korridor zu Orwigs Arbeitszimmer führt ein paar Schritte weiter zu einem Komplex von Räumen, in denen Hunderte von Mäusen untergebracht sind. Um ihn betreten zu können, muss man Laborkittel, Gummistiefel und Gesichtsmaske anlegen – nicht damit man sich nicht bei den Mäusen ansteckt, sondern damit diese sich nichts vom Besucher einfangen. Viele Käfige beherbergen so genannte Nacktmäuse: rosafarbene, runzelige kleine

Einen Erfolg erkennt man schon bald: wenn die Männchen Vater werden

Nagetiere, die einem Hodensack mit Augen und Füßen ähneln. Auf Grund eines Gendefekts fehlen ihnen nicht nur die Haare, sondern sie haben auch ein beeinträchtigtes Immunsystem und tolerieren deshalb verpflanzte Zellen anderer Spezies, beispielsweise menschliche Spermato gonien mit Mutationen. Auf diese Weise versuchen Forscher die biologischen Grundlagen männlicher Unfruchtbarkeit besser zu verstehen.

Durch solche Räume wird der Weg zur Keimbahnmodifikation bei Menschen verlaufen. CRISPR macht dabei die Arbeit effizienter, aber eigentlich kann man die Gene Spermien produzierender Zellen schon seit mehr als 20 Jahren verändern: Orwigs Mentor, der Biologe Ralph Brinster von der University of Pennsylvania, führte 1994 die ersten entscheidenden Experimente dazu durch.

Männliche Unfruchtbarkeit kann viele Ursachen haben, darunter schlichte Verstopfung der Samenleiter und Aussetzer im komplizierten Prozess der Spermienbildung. In vielen Fällen produzieren die Betroffenen aber einfach überhaupt keine Samenzellen. Von dieser »nichtobstruktiven Azoospermie« sind laut Orwig allein in den USA rund 350 000 Männer betroffen.

Mit der ausbleibenden Spermienproduktion wurden mehrere Gene in Verbindung gebracht, darunter *tex11* und *sohlh1*. Solche Fälle bilden den Hintergrund für das Expe-

riment, das Orwig gern anstellen würde. Der Forscher möchte bei unfruchtbaren Mäusen mit einem solchen Gendefekt die Spermien bildenden Stammzellen aus den Hoden entnehmen und das Problem mit den neuen Gen-Editing-Methoden beseitigen.

Wenn sich die veränderten Zellen im Labor ausreichend stark vermehrt haben und auf die korrekte Modifikation hin überprüft wurden, kann man sie wieder in die Hoden der Tiere zurück verpflanzen. Derartige Versuche benötigen keine raffinierten molekularbiologischen Tests zur Erfolgskontrolle: Eine gelungene Reparatur erkennt man schon nach wenigen Monaten, sobald die zuvor unfruchtbaren Männchen Vater werden.

»Schon seit 25 Jahren verpflanzen wir Stammzellen bei fast allen biologischen Arten – bei Mäusen, Ratten, Hamstern, Schafen, Ziegen, Schweinen und Affen«, sagt Orwig. »Das repräsentiert einen ziemlich breiten Ausschnitt aus der Evolution, und soweit wir wissen, ist bei all diesen Tieren nie etwas schiefgegangen.« Deshalb ist Orwig optimistisch, dass man durch Genveränderung in den Stammzellen von Mäusen auch Unfruchtbarkeit heilen kann.

Das würde allerdings die genannte rote Linie der dauerhaften Keimbahnveränderung überschreiten. Zwar beabsichtigt Orwig nicht, in seinem Pittsburgher Labor ein solches Experiment an Menschen anzustellen. Dennoch dürfte eine erfolgreiche vorklinische Erprobung an Mäusen und Primaten entsprechende Versuche im privatwirtschaftlichen Bereich anstoßen.

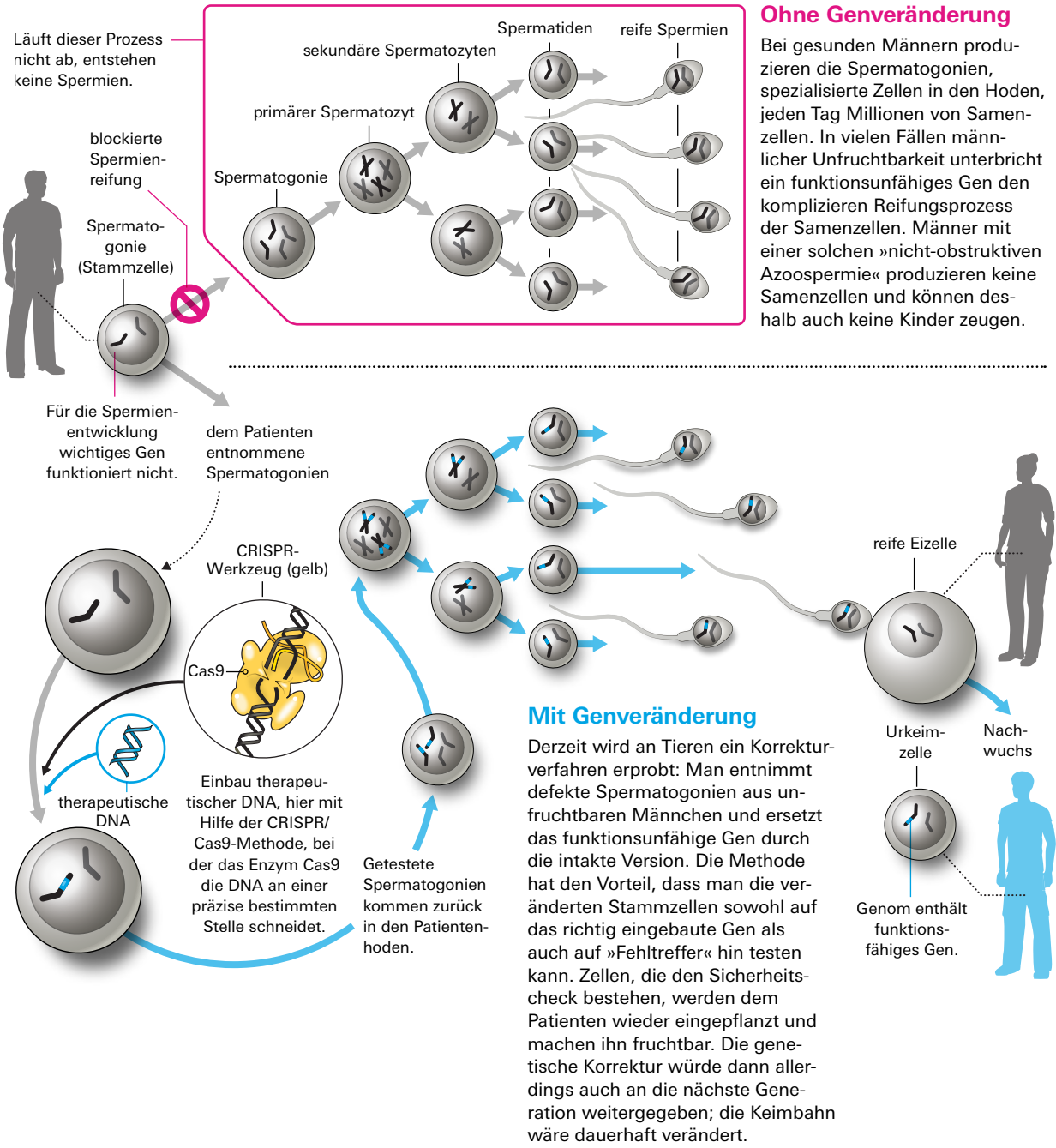
Natürlich stünde das Entwickeln eines solchen klinischen Therapieverfahrens vor beträchtlichen technischen Hürden. So müsste man menschliche Spermato gonien lange genug am Leben halten, damit man die richtigen Zellen für die Transplantation auswählen kann – und das ist bis heute keine einfache Aufgabe. Aber immerhin stellen die männlichen Stammzellen ein stabileres Ziel dar als Embryonen, die sich laufend weiterentwickeln und sich dabei schnell verändern. Beispielsweise berichteten die chinesischen Wissenschaftler, die Gene von Embryonen mit CRISPR abwandeln wollten, über unerwünschte Mutationen und so genannte Mosaik – dass also nur ein Teil der Zellen der Embryonen modifiziert waren. Außerdem kann man bei Stammzellen die veränderte DNA erst einmal überprüfen, bevor man den Schritt zum Embryo macht.

Die rote Linie wird man in privaten Fruchtbarkeitskliniken irgendwo in der Welt überschreiten

Und dann wären da noch die politischen und juristischen Hürden (zur Situation in Deutschland siehe S. 46/47). Die National Institutes of Health dürfen keine Forschungsarbeiten finanzieren, in deren Rahmen menschliche Embryonen zerstört werden. Orwigs geplanten Tierversuch auf den Menschen zu übertragen, würde dieses Verbot zwar umgehen, könnte aber unter eine Einschränkung fallen, die das US-Repräsentantenhaus zwei Wochen nach dem erwähnten Gipfeltreffen zur Genveränderung erließ. In zwei Sätzen, die sich in dem 2009 Seiten starken Ausgabenbudget für 2015 verstecken, verbot der Kongress medizinische Eingriffe, die genetisch veränderte Embryo-

Angriff auf die Keimbahn

Chinesische Wissenschaftler haben bereits versucht, die Gene menschlicher Embryonen zu Forschungszwecken zu verändern. Außerdem gehen sie der Frage nach, wie man Gene in Keimzellen (Ei- oder Samenzellen) modifizieren kann – das Resultat würde an die nächste Generation weitergegeben. Ein potenzieller Weg verläuft über Stammzellen, die Samenzellen erzeugen; dies könnte zu Therapien für männliche Unfruchtbarkeit (unten) sowie verschiedene Einzelgenerkrankungen führen. Im Jahr 2015 korrigierten chinesische Forscher beispielsweise mit einem solchen Verfahren eine Mutation, die bei Mäusen grauen Star entstehen lässt.



JEN CHRISTIANSEN, SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2016, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



FOTOLIA / FRENTA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/klone-und-stammzellforschung

nen in irgendeiner Form involvieren. Die Formulierung untersagt zwar nicht ausdrücklich das Manipulieren von Keimzellen, könnte aber dennoch die Entwicklung aus juristischen Gründen um Jahre verzögern.

Mit seinen Versuchen an Mäusen würde Orwig noch nicht gegen das US-amerikanische Gesetz verstoßen – sie wären nur ein kleiner Schritt in Richtung Keimbahnmodifikation. Das tatsächliche Überqueren des Rubikon dürfte sich in privaten Fruchtbarkeitskliniken irgendwo in der

Welt abspielen, die eine lange (und teilweise unrühmliche) Erfahrung damit haben, neue Reproduktionstechnologien voranzutreiben. Das könnte etwa in China geschehen oder in Großbritannien, wo die Regierung das klinische Erproben einer Form der Keimbahnmodifikation namens Mitochondrien-Ersatztherapie abgesegnet hat und im Februar 2016 auch Genveränderungsexperimente an menschlichen Embryonen genehmigte.

In den Vereinigten Staaten wird es wahrscheinlich nicht passieren, solange Öffentlichkeit und Politik die Keimbahnmodifikation nicht aufgeschlossener betrachten – aber auf diesen Tag bereitet sich Orwig bereits vor. Derzeit sind die Einstellungen zum Thema sehr kompliziert und widersprüchlich. Einer Mehrheit der US-Amerikaner gefällt der Gedanke nicht, Gene in Embryonen oder auch in Keimzellen zu verändern, besagt eine neue Analyse von 17 Meinungsumfragen im »New England Journal of Medicine«. Aber paradoxerweise sprechen sich die meisten Menschen durchaus für Genveränderungen bei Erwachsenen aus, wenn das verhindert, dass ihre Kinder bestimmte

Die Gen-Editing-Debatte in Deutschland

Die CRISPR/Cas-Methode ermöglicht DNA-Manipulationen von bislang unbekannter Präzision. Auch an Zellen menschlichen Ursprungs experimentieren Forscher damit bereits weltweit. Einer Veränderung menschlicher Keimbahnzellen stehen in Deutschland derzeit beachtliche juristische und ethische Hürden entgegen.

International liegt die Hemmschwelle wesentlich niedriger, zumal wenn es um Eingriffe in die Spermien-DNA geht. Die jüngsten Versuche, über das Gen-Editing an Spermien etwa einen bestimmten Typ männlicher Unfruchtbarkeit zu therapieren, könnten auch hier zu Lande der Keimbahntherapie eine Hintertür öffnen. Zu welchen Anpassungen wird der sich rasant entwickelnde biotechnologische Fortschritt in Deutschland führen?

Juristische Hürden sind erfahrungsgemäß flexibel. Das deutsche Embryonenschutzgesetz (ESchG) von 1990 bietet auf den ersten Blick allerdings kaum Ermessensspielräume. Es soll das missbräuchliche Anwenden der In-vitro-Fertilisation zum Erzeugen menschlicher Embryonen verhindern. Die künstliche Befruchtung wird nur gestattet, um eine Schwangerschaft herbeizuführen; andere Verwendungen – etwa zu Forschungszwecken – sind weitgehend ausgeschlossen. Wer Erbinformationen menschlicher Keimbahnzellen verändert oder humane Keimzellen klonet, dem drohen in Deutschland bis zu fünf Jahre Gefängnis oder hohe Geldstrafen.

Der Gesetzgeber hat hier zu Lande aber versucht, sowohl die Komplexität der medizinischen Praxis zu berücksichtigen als auch die Freiheit der Forschung zu gewährleisten: An menschlichen Keimzellen, die nicht zur Befruchtung bestimmt sind, oder an körpereigenen Zellen, für die keine Übertragung vorgesehen ist, sind Erbgutmanipulationen durchaus erlaubt. Straffrei bleiben zudem unbeabsichtigte Veränderungen, etwa infolge von Impfungen sowie von Strahlen- oder Chemotherapie.

Welche praktischen Konsequenzen sich im Einzelfall aus dem Embryonenschutzgesetz ergeben, ist oft umstritten, denn die Forschung betritt immer wieder Neuland. So etwa bei der Einführung der Präimplantationsdiagnostik (PID) in den frühen 1990er Jahren: Ein Urteil des Bundesgerichtshofs machte 2010 deutlich, dass die Präimplantationsdiagnostik in manchen Fällen nicht nach dem Embryonenschutzgesetz bestraft werden könne, da sich diesem zum einen nicht mit Bestimmtheit entnehmen lasse, dass die PID verboten sei. Zum anderen konnte der Gesetzgeber 1990 die sich gerade erst entwickelnde PID noch nicht vor Augen gehabt haben.

2011 kam es daher zur Novellierung des Gesetzes: Nach § 3a ESchG ist seither die Präimplantationsdiagnostik innerhalb enger Grenzen zulässig, etwa zur Vermeidung schwer wiegender Erbkrankheiten. Vergleichbares ist zu erwarten, sobald sich die CRISPR/Cas-Methode anderen Orts auf Grund erster Erfolge zu etablieren beginnt.

Krankheiten erben. Außerdem wies die Studie darauf hin, dass viele derartige Meinungserfassungen ihre Fragen nicht immer wissenschaftlich präzise formulierten. Mit anderen Worten: Obwohl die Tagung der Wissenschaftsakademien im Dezember 2015 mit dem Plädoyer zu Ende ging, die öffentliche Diskussion über Keimbahnveränderung fortzusetzen, ist unklar, ob die Öffentlichkeit die Begriffe in diesem Gespräch überhaupt versteht. Und während man sich noch um einen geeigneten Wortschatz bemüht, läuft der wissenschaftliche Fortschritt inzwischen davon.

Von den aktuellen Publikationen aus dem Fachbereich gefällt Orwig eine besonders gut, die ein Team unter Leitung von Qi Zhou von der chinesischen Wissenschaftsakademie im März 2016 veröffentlichte. Ihr Experiment liefert im Wesentlichen ein Rezept zum Produzieren von Keimbahnzellen in vitro. Die Forscher stellten in Kulturgefäßen Spermien produzierende Stammzellen her. Spritzten sie diese danach in Eizellen, entstanden vermehrungsfähige Mäuse.

Ländergrenzen und nationale Gesetze spielen heutzutage bei solchen Entwicklungen keine Rolle mehr. Ist der Damm erst gebrochen, werden Leute mit veränderter Keimbahn in der Welt herumreisen und sich irgendwo vielleicht fortpflanzen. Die Veränderungen fließen dann auch in anderen Ländern in den Genpool ein – eine schöne neue Welt durch die Hintertür. ◀

QUELLEN

Bosley, K. S. et al.: CRISPR Germline Engineering – The Community Speaks. In: *Nature Biotechnology* 33, S. 478–486, Mai 2015

Gassei, K., Orwig, K. E.: Experimental Methods to Preserve Male Fertility and Treat Male Factor Infertility. In: *Fertility and Sterility* 105, S. 256–266, 2016

Rogers, M.: The Pandora's Box Congress. In: *Rolling Stone*, 19. Juni 1975

Zhou, Q. et al.: Complete Meiosis From Embryonic Stem Cell-Derived Germ Cells in Vitro. In: *Cell Stem Cell* 18, S. 330–340, 2016

Ethische Hürden stehen insbesondere in der Fortpflanzungsmedizin gelegentlich im Verdacht, ein Verfallsdatum zu haben, das eher an Lebensmittelkennzeichnung denn an Gesetzgebung erinnert. Droht der Mensch durch den biotechnologischen Fortschritt zu einem ganz anderen Wesen zu werden, das möglicherweise gesünder, aber nicht mehr menschlich ist? Beim Zugriff auf unsere Erbsubstanz könnte damit so etwas scheinbar Altmodisches wie die Menschenwürde auf der Strecke bleiben.

In der anlaufenden juristischen und ethischen Debatte um die CRISPR/Cas-Technik zeichnen sich zwei Lager ab: Auf der einen Seite stehen die Naturwissenschaftler, zumeist Befürworter eines sich rasant beschleunigenden biotechnologischen Fortschritts, der offensive bis aggressive Züge trägt und stets zum Handeln drängt. Auf der anderen Seite die eher unfreiwillig defensiven Sozial- und Geisteswissenschaftler, die sich als Bedenkensträger vor allem einer Kultur der Reflexion verpflichtet fühlen.

Mittlerweile ist auf beiden Seiten jedoch die Einsicht gewachsen, dass die Debatte um die Zukunft der Gentechnologie viel zu wichtig ist, um sie allein den Naturforschern zu überlassen. Auch kristallisiert sich zunehmend heraus, dass es kein absolutes Ja oder Nein hinsichtlich der Gentechnologie geben kann. Damit lässt sich aktuell folgende Zwischenbilanz zur bioethischen Debatte hier zu Lande ziehen:

1. Der biotechnologische Fortschritt, insbesondere die fortpflanzungsmedizinische Praxis, hat unseren Bezug zum Leben verändert. Es ist nicht absehbar, welche der historisch gewachsenen und bislang kulturell fest

verankerten Normen und Werthaltungen uns weiterhin als Richtschnur des Handelns dienen können.

2. Bislang hat sich die Forschung ihren humanen Impuls bewahrt. In Deutschland hat die Politik zudem über Jahrzehnte hinweg Ethik, Recht und Moral auf die unverändert gültigen Werte der Humanität verpflichtet; der Gesetzgeber hat eine Entkoppelung von Menschenwürde und Lebensschutz verhindert.

3. Künftig wird sich kaum noch ein moralischer Konsens mit der bloßen Berufung auf die Grundrechte – insbesondere auf die Menschenwürde – erzielen lassen. Wir werden daher vermehrt mühsam abwägen müssen, welche biotechnologischen Optionen es zu verwirklichen gilt und auf welche besser verzichtet wird. Allgemein anerkannte Kriterien, die zwischen notwendigem Wertewandel und verhängnisvollem Werteverfall zuverlässig unterscheiden, stehen uns jedoch nicht zur Verfügung.

4. Das Dilemma, sich jeweils zwischen einer allgemeinen Ethik der Würde und einer konkreten Ethik des Helfens entscheiden zu müssen, lässt sich kaum auflösen. Denn aus der Perspektive eines schwer Erkrankten sind ethische Debatten purer Luxus.

5. Absolute Gesundheit wird nur um den Preis absoluter biologischer Kontrolle und Auslese zu haben sein. Den »Menschen nach Maß« brauchen wir aber keinesfalls – Medikamente und Therapien nach Maß indes schon.

Reinhard Lassek ist promovierter Biologe und Wissenschaftsautor in Celle. Er schreibt unter anderem über Fragen der naturwissenschaftlichen und medizinischen Ethik.



KLIMAWANDEL TAUENDE TUNDRA

Die vielerorts steigenden Temperaturen erwärmen auch riesige Permafrostflächen in den Polarregionen. Vermutlich wird das die globale Erwärmung weiter anfachen. Nur wie stark?



Edward A.G. »Ted« Schuur ist Professor für Ökosystem-Ökologie an der Northern Arizona University in Flagstaff. Er betreibt seit fast zwei Jahrzehnten Feldforschung in der Arktis und ist leitender Wissenschaftler des Permafrost Carbon Network, einer internationalen Forschergruppe, die neue Erkenntnisse über den Kohlenstoff im Permafrost und dessen Einfluss auf das Klima zusammenführt.

» spektrum.de/artikel/1438960

Wissenschaftler ziehen am Forschungsstandort Eight Mile Lake bei Healy, Alaska, einen Bohrkern aus dem Permafrostboden. Farbe und Textur der Probe (rechtes Bild) deuten auf einen hohen Gehalt an organischem Material hin. Mikroorganismen zersetzen es, wodurch Treibhausgase in die Luft gelangen.



Plötzlich entgleitet mir der 20 Kilogramm schwere Block aus Eis und Schnee. Trotz der Gummihandschuhe rutscht er aus meinen Händen und fällt krachend in den Graben zurück, den ich gerade aushebe. Ich richte mich auf, hole Atem und strecke mich. Mein Rücken schmerzt, obwohl ich extra einen Gewichtshebergürtel angelegt habe. Es ist ein klarer, kalter Tag in der Tundra Zentralalaskas. Zusammen mit fünf Kollegen schaufele ich seit mehr als einer Woche verkrusteten Schnee. Tonnen von Schnee, die sich an einem von sechs Fangzäunen gesammelt haben, hier, an einem leicht geneigten Hang unweit des Denali-Nationalparks.

Die harte Arbeit ist Teil eines Experiments, mit dem wir die Auswirkungen der globalen Erwärmung in dieser abgelegenen Gegend simulieren wollen. Die acht Meter langen und eineinhalb Meter hohen Zäune errichten wir jeden Herbst an dieser Stelle. Der Schnee, der sich an ihnen sammelt, schützt den Permafrostboden vor der eisigen Winterluft – er wirkt gewissermaßen wie eine Decke. Dadurch bleibt die Oberfläche des gewöhnlich ganzjährig gefrorenen Bodens wärmer, als sie normalerweise wäre. Im Frühjahr entfernen wir den überschüssigen Schnee, damit der Frühling unsere Versuchsflächen zur gleichen Zeit trifft wie die umliegende Tundra.

Indem wir den gefrorenen Boden im Winter wärmer halten, taut er im Sommer früher und bis in tiefere Schichten auf. Das soll Prognosen zufolge auch dann passieren, wenn die Temperaturen überall in der Arktis und in den Waldgebieten südlich davon steigen. Die Erwärmung schreitet hier momentan doppelt so schnell voran wie im weltweiten Durchschnitt. Aber was macht das mit dem Permafrostboden? So viel wissen wir: Er besteht aus Gestein, gefrorenem Erdschutt und Eis. Daher schmilzt er bei Erwärmung nicht, sondern taut. Wie ein Stück Hackfleisch, das aus dem Gefrierfach kommt, wird er weich, aber nicht flüssig. Dabei erwachen Mikroorganismen darin aus ihrem Kälteschlaf. Sie zersetzen die Überreste von Pflanzen und Tieren, die sich im gefrorenen Boden über



BRIAN ADAMS

Jahrtausende hinweg angesammelt haben und heute vor allem aus Kohlenstoff bestehen. Die Mikroben verwandeln dieses Material in die Treibhausgase Kohlendioxid oder Methan, die in die Luft entweichen.

Der Permafrostgürtel auf der Nordhalbkugel enthält solch gewaltige Mengen an organischem Material, dass schon die Freisetzung eines Teils davon den Klimawandel stark anfachen würde. Der durchgängig gefrorene Boden erstreckt sich über 16,7 Millionen Quadratkilometer – eine Fläche fast so groß wie Südamerika. Zusammen mit anderen Forschungsvorhaben soll unser Projekt in Alaska ergründen, wie groß die Erwärmung durch Permafrost in den kommenden Jahrzehnten tatsächlich sein wird.

Es ist allerdings alles andere als einfach, diese Frage mit genauen Zahlen zu beantworten. Zwar können Satelliten Veränderungen der Eisbedeckung aufzeichnen, wie sie etwa in Grönland stattfinden. Doch ein flächendeckendes Fernerkundungssystem für Permafrostregionen gibt es nicht. Wissenschaftler werten daher die Daten von Bodensensoren aus, die sie an bestimmten Stellen installiert haben. Lange gab es zu wenige dieser Messpunkte, weshalb wir laufend zusätzliche Sensoren installiert haben. Zusammen bilden sie das Global Terrestrial Network for Permafrost. Es umfasst mittlerweile mehr als 1000 mit Instrumenten ausgekleidete Bohrlöcher. In ihnen zeichnen Messfühler die Temperaturen auf, sowohl in den oberen als auch in tieferen Bodenschichten.

Wie die Messungen des Sensornetzes zeigen, hat sich der Permafrostboden innerhalb der vergangenen Jahrzehnte stetig erwärmt, wobei in den letzten Jahren an vielen Standorten neue Wärmerekorde zu verzeichnen waren. Die dramatischsten Anstiege gab es dort, wo die Bodentemperaturen in der Vergangenheit sehr niedrig

AUF EINEN BLICK ZEITBOMBE PERMAFROST

- 1** Permafrost – ganzjährig gefrorener Boden – taut in weiten Teilen der Arktis auf. Mikroben zersetzen dann Überreste von Pflanzen und Tieren, wobei sie Kohlendioxid und Methan in die Atmosphäre freisetzen.
- 2** Die ausgedehnte Permafrostregion der Nordhalbkugel speichert knapp 1,5 Billionen Tonnen organischen Kohlenstoff, etwa das Doppelte der in der Erdatmosphäre enthaltenen Menge.
- 3** 5 bis 15 Prozent dieses Reservoirs könnten in diesem Jahrhundert entweichen und den Klimawandel beschleunigen. Der beste Weg, das zu verhindern, ist, die globale Erwärmung insgesamt zu drosseln.



BRIAN ADAMS

Nicht weit von den schneebedeckten Gipfeln der Alaskakette messen Sensoren in weißen Kammern die Aufnahme und Abgabe von Kohlendioxid im Boden (links). Meghan Taylor von der Northern Arizona University zeichnet die Daten auf (rechts).



BRIAN ADAMS

lagen, bei minus zehn bis minus fünf Grad Celsius. Wir haben aber auch dort höhere Temperaturen registriert, wo der Boden mit minus zwei bis null Grad Celsius näher am Gefrierpunkt liegt und daher bereits eine Veränderung von einem Grad erhebliche Folgen haben kann. An einigen dieser Stellen taut außerdem im Frühling eine immer dickere Schicht an der Oberfläche auf.

50 Kilogramm Kohlenstoff in jedem Kubikmeter

Wenn wir alle weltweit aufgezeichneten Daten kombinieren, gewinnen wir ein gutes Verständnis dafür, wie sich die Bodentemperaturen in der Arktis verändern. Uns interessiert dabei nicht nur, wie viel Permafrost auftauen könnte. Wir wollen auch wissen, wie hoch der Anteil organischer Substanz in den aufweichenden Böden ist. Um diese Frage zu beantworten, hat mein Team im Frühjahr 2016 Löcher in den Untergrund gebohrt und Bodenproben entnommen. Seit Beginn unseres Projekts vor einem Jahrzehnt haben wir das immer wieder getan. Diese und andere Messreihen zeigen, dass der oberste Kubikmeter Boden etwa 50 Kilogramm organischen Kohlenstoff enthält. Das ist die fünffache Menge im Vergleich zu Böden der gleichen Region, die nicht dauerhaft gefroren sind. Und sogar das 100-Fache dessen, was Sträucher und andere Pflanzen in der Arktis speichern.

Mit organischem Kohlenstoff ist der Kohlenstoff gemeint, der in teilweise zersetzten, gefrorenen Organismen gebunden ist. Diese Präzisierung ist wichtig, da im Gestein so genannter anorganischer Kohlenstoff steckt, der sich bei Temperaturveränderungen aber meistens nicht löst. Insgesamt schätzen Forscher die im Permafrost der Nordhalbkugel gespeicherte Menge von organischem Kohlenstoff auf 1330 bis 1580 Milliarden Tonnen – etwa das

Doppelte des atmosphärischen Kohlenstoffgehalts. Allein die obersten drei Meter Boden im Permafrostgürtel enthalten ein Drittel der weltweiten Reserve in dieser obersten Schicht. Dabei nimmt die Zone gerade mal 15 Prozent der globalen Bodenfläche ein.

Wissenschaftler erfassen mittlerweile auch das Inventar organischen Kohlenstoffs an zuvor nie untersuchten Stellen, etwa am Meeresgrund der arktischen Schelfgebiete. Dieser submarine Permafrost löst sich langsam auf, wenn Meerwasser in ihn einsickert. Wir wissen noch nicht genau, wie viel organischer Kohlenstoff dort lagert. Fest steht, dass er ebenfalls in den Sedimenten der riesigen arktischen Flussdeltas enthalten ist. Allerdings gibt es dort bisher nur wenige Messpunkte. Diese Unterwasser-Reservoirs könnten unseren Schätzungen zufolge ungefähr 400 Milliarden Tonnen Kohlenstoff enthalten.

Fest steht, dass gewaltige Mengen Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen würden, wenn die Permafrostböden auf der Nordhalbkugel auftauen. Wie groß der Betrag genau sein wird, hängt letztlich von drei Fragen ab. Erstens: Wie viel des Kohlenstoffs wandelt sich in Treibhausgase um? Mikroorganismen können nur einen Teil vom Kohlenstoff in ihren Stoffwechsel einbinden. Der Rest verbleibt im Boden, da er für die Mikroorganismen unerreichbar ist oder nicht als Nahrung taugt.

Zweitens: Wie schnell setzt mikrobielle Aktivität die Gase frei? Nach dem Auftauen des Bodens kann ein Teil des Kohlenstoffs aus zerfallener Biomasse in weniger als einem Jahr in die Luft gelangen. Der größere Teil wird aber höchstwahrscheinlich erst über Jahrzehnte emittiert. Der Grund dafür ist unter anderem, dass die Biomasse schon zu einem Teil zersetzt ist. In diesem Zustand bauen Mikroorganismen sie nur langsam weiter ab.



ISTOCK / KRISSANAPONGW

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Die dritte Frage ist, welche Gase genau von den Mikroorganismen freigesetzt werden. Das Verhältnis von Kohlendioxid zu Methan bestimmt letztlich die Klimawirkung des Kohlenstoffs im Boden. Eine Tonne Methan erwärmt die Atmosphäre binnen 100 Jahren 33-mal so stark wie eine Tonne CO₂. Unter Wasser gesetzte, sauerstoffarme Böden (so genannte anaerobe Milieus) wie etwa Torfmoore produzieren weit mehr Methan als Kohlendioxid.

Um die drei Fragen zu beantworten, verfolgen wir die Gasfreisetzung aus dem Permafrost mit Infrarotmessgeräten. Sie erfassen die Konzentration der Gase in der Luft über Sekunden, Tage, Jahreszeiten und Jahre hinweg. An unserer eingangs erwähnten Messstation in Alaska, die sich in der Nähe des Eight Mile Lake befindetet, scheint die Tundra mehr Kohlenstoff an die Atmosphäre zu verlieren, als sie absorbiert. Die Erwärmung des Bodens durch Schnee entlang der Zäune fördert zwar das Wachstum der Pflanzen, die dabei der Luft größere Mengen Kohlendioxid als gewöhnlich entziehen und dieses speichern. Die steigenden Temperaturen helfen aber auch den Mikroorganismen, mehr kohlenstoffhaltige Biomasse im Boden zu zersetzen. Im Sommer gleicht das zusätzliche Pflanzenwachstum die erhöhten Emissionen aus dem Boden vollständig aus. Doch die Mikroben sind, anders als die Pflanzen, auch im Herbst und Winter aktiv. Über das ganze Jahr betrachtet gelangt daher mehr Kohlenstoff in Form von

Treibhausgasen in die Atmosphäre, als die Flora binden kann. Wenn wir unsere Befunde mit denjenigen anderer Teams kombinieren, kommen wir zu dem Ergebnis, dass dieser Befund generell für tauende Permafrostregionen gilt.

Ein Projekt unseres Netzwerks hat kürzlich auch dazu beigetragen, die Frage nach dem Verhältnis von Kohlendioxid zu Methan zu beantworten. Unter aeroben Bedingungen, wie sie in trockenen Böden vorliegen, setzen Mikroorganismen vorwiegend CO₂ frei. Doch unter anaeroben Bedingungen in Feuchtgebieten und Torfböden sondern sie neben Kohlendioxid auch Methan ab. Christina Schädel, die an der Northern Arizona University arbeitet, erforscht die daraus erwachsenden Folgen für das Klima. Im Gegensatz zu unseren Feldstudien verließ sich Schädel auf Experimente, bei denen Forscher gefrorenen Boden ins Labor bringen und dort erwärmen. Auf diese Weise können die Wissenschaftler exakt messen, wie schnell Kohlenstoff aus dem Boden in Kohlendioxid beziehungsweise Methan umgewandelt wird.

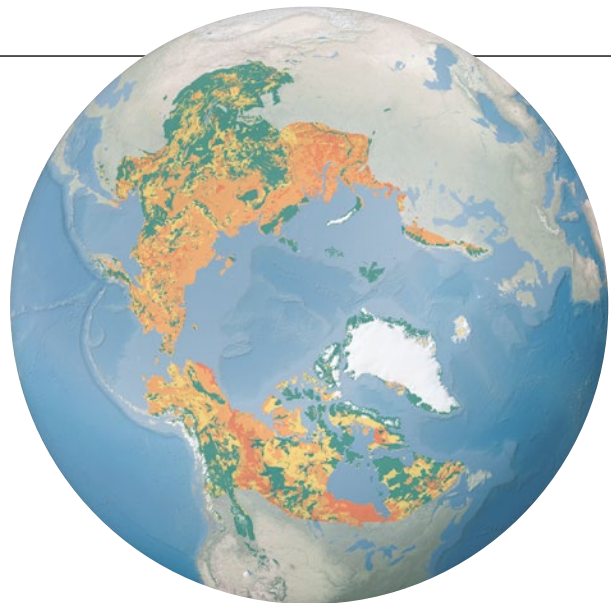
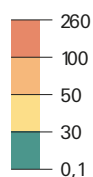
Schädel führte Daten von vergleichbaren, weltweit durchgeführten Tests zusammen. Dabei zeigte sich, dass die Kohlendioxidemissionen klar dominieren, sowohl bei aeroben als auch bei anaeroben Böden. Überraschenderweise ist der Klimabeitrag aerober Zersetzung doppelt so groß wie der von anaerobem Zerfall, obwohl Letzterer das besonders potente Methan emittiert. Das bedeutet, dass das Auftauen von Permafrost im trockenen Hochland die globale Erwärmung vermutlich stärker anfachen wird als das in nassen Niederungen. Daher hat die Verteilung von Hoch- und Tiefland in den Polargebieten einen großen Einfluss auf den Klimawandel.

Insgesamt schätzt unser Expertennetzwerk, dass in diesem Jahrhundert zwischen 5 und 15 Prozent des Kohlenstoffs freigesetzt werden, das meiste in Form von CO₂. Ausgehend vom mittleren Wert, also zehn Prozent, würden bis zum Jahr 2100 130 bis 160 Milliarden Tonnen

Kohlenstoffreservoir

Die Permafrostzone der Nordhalbkugel (farbig) enthält in den obersten drei Metern des gefrorenen Bodens geschätzte 1035 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, die beim Auftauen entweichen und damit die globale Erwärmung deutlich verstärken könnten. Permafrost herrscht in den nördlichsten Regionen fast überall vor. Weiter im Süden tritt er lückenhafter auf, doch in beiden Regionen speichern viele Gebiete große Mengen an Kohlenstoff (rot und orange).

Kohlenstoff in den obersten drei Bodenmetern (in Kilogramm pro Quadratmeter Erdoberfläche)



MAPPING SPECIALISTS, NACH: SCHUIJR, E. A. G. ET AL.: CLIMATE CHANGE AND THE PERMAFROST CARBON FEEDBACK. IN: NATURE 520, S. 171-179, 2015

Kohlenstoff zusätzlich in die Luft gelangen. Diese Menge entspräche etwa dem Kohlenstoff, der bisher weltweit durch Abholzung und andere Veränderungen der Landnutzung in die Atmosphäre eingetreten ist. Der Wert wäre allerdings viel geringer als derjenige aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Durch diese wurden allein im Jahr 2012 knapp zehn Milliarden Tonnen Kohlenstoff frei.

Dennoch gilt: Durch die tauenden Böden wird der Klimawandel schneller ablaufen, als die Wissenschaftler allein angesichts der anthropogenen Emissionen vorhergesagen. Und dem Permafrost werden wahrscheinlich auch im kommenden Jahrhundert noch Treibhausgase entweichen. Jede zusätzliche Tonne Kohlenstoff, die aus der tauenden Arktis in die Atmosphäre gelangt, wird für die Menschheit zusätzliche Kosten verursachen.

Maßnahmen, diesem Trend durch lokale Eingriffe in die arktische Landschaft zu begegnen, sind keine realistische Option. Die einzige Lösung besteht darin, die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger und auf Grund weltweiter Abholzung stark herunterzufahren und so die globale Erwärmung insgesamt zu bremsen. Dadurch würde die Arktis langsamer auftauen und weniger Treibhausgase freisetzen. Menschen überall auf der Welt bliebe somit mehr Zeit zur Anpassung.

Absackende Böden beschleunigen das Auftauen

Die Schätzung, dass 5 bis 15 Prozent des Kohlenstoffs entweichen könnten, ist gerade einmal zwei Jahre alt. Für genauere Vorhersagen bräuchten wir ein noch besseres Sensornetzwerk. Es wäre im Stande, neben langfristigen Trends auch plötzliche Veränderungen zu detektieren. Initiativen wie das Arktisprojekt der Next-Generation Ecosystem Experiments des Energieministeriums der Vereinigten Staaten oder das Arctic-Boreal Vulnerability Experiment der NASA helfen uns derweil, Wissenslücken zu schließen. Diese gibt es beispielsweise bei der Modellbildung oder wenn Ergebnisse von Feldstudien auf den globalen Maßstab übertragen werden sollen.

Eine wichtige Frage ist auch, ob zunehmendes Pflanzenwachstum die Freisetzung des Kohlenstoffs ausgleichen könnte. Die jüngsten Simulationen deuten in diese Richtung. Demnach könnten längere Vegetationsperioden, höhere Temperaturen, mehr Pflanzennährstoffe aus Biomasseabbau und ein natürlicher Wandel hin zu schneller wachsenden Pflanzen die Kohlenstofffreisetzungen bis zum Ende des Jahrhunderts kompensieren. Diese Theorie steht allerdings im Konflikt zu unseren Experimenten vom Eight Mile Lake und anderen Standorten, die einen Verlust von Kohlenstoff an die Atmosphäre über das ganze Jahr verteilt nahelegen.

Ebenso wäre es hilfreich, wenn wir besser verstehen würden, wie tauender Boden absinkt. Wenn Eis im Permafrost schmilzt und als Wasser abfließt, sackt das Erdreich nach unten, was sein Auftauen beschleunigt. Vielleicht wird dieses Phänomen die Emissionen noch verstärken. Derzeit fehlen entsprechende Simulationen in den großflächigen Modellen, mit denen Forscher den Einfluss des Kohlenstoffs aus Permafrost auf das Klima untersuchen. Meine Kollegen und ich erlebten den Effekt im Frühjahr



Das ganze Jahr über misst ein Instrumententurm, wie viel Kohlendioxid und Methan der Boden der Tundra freisetzt. So ermitteln die Forscher, ob das Ökosystem unter dem Strich Treibhausgase aufnimmt oder abgibt.

2016 ganz direkt, als wir zum Eight Mile Lake zurückkehrten. Der Boden hatte wegen der Absenkung an manchen Stellen Wellen gebildet. Die Holzwege, die wir vor fast einem Jahrzehnt angelegt hatten, sind stark verbogen worden.

Im Frühjahr 2016 taute es am Eight Mile Lake zudem an einigen Stellen bis in eine Tiefe von mehr als einem Meter. Ein solcher Wert war in den Jahren zuvor meist erst am Ende des Sommers erreicht worden. Extreme Messdaten zeigten sich auch anderswo in der Arktis: Die winterliche Eisdecke im Nordpolarmeer erlebte schon früh im Jahr einen Rekordrückzug. Der Schnee rund um die Nordhalbkugel schmolz vielerorts schneller als sonst. Und die Oberfläche des grönländischen Eisschildes taute eher auf als in der Vergangenheit.

Schon jetzt entweichen aus dem Permafrostboden zudem laufend Treibhausgase. In Zukunft wird die Freisetzung wohl nicht so rapide erfolgen, wie mancher Klimaforscher in der Vergangenheit befürchtet hat. Dafür wird sie an vielen Orten auftreten und über viele Jahrzehnte hinweg anhalten – und es so deutlich schwerer machen, die globale Erwärmung zu bremsen. ◀

QUELLEN

Schuur, E. A. G., Abbott, B.: Climate Change: High Risk of Permafrost Thaw. In: Nature 480, S. 32–33, 2011

Schuur, E. A. G. et al.: Expert Assessment of Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change. In: Climatic Change 119, S. 359–374, 2013

Schuur, E. A. G. et al.: Climate Change and the Permafrost Carbon Feedback. In: Nature 520, S. 171–179, 2015

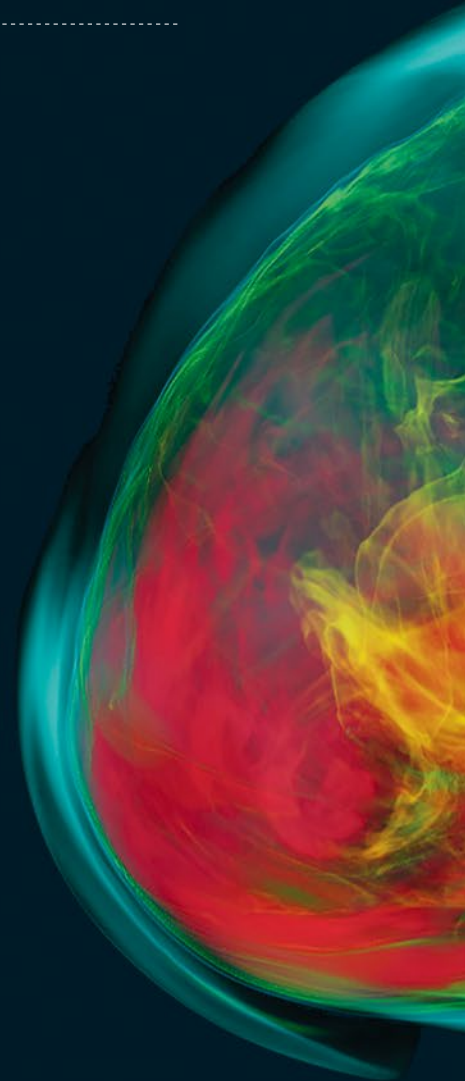
ASTRONOMIE EIN FEUERWERK EXPLODIERENDER STERNE

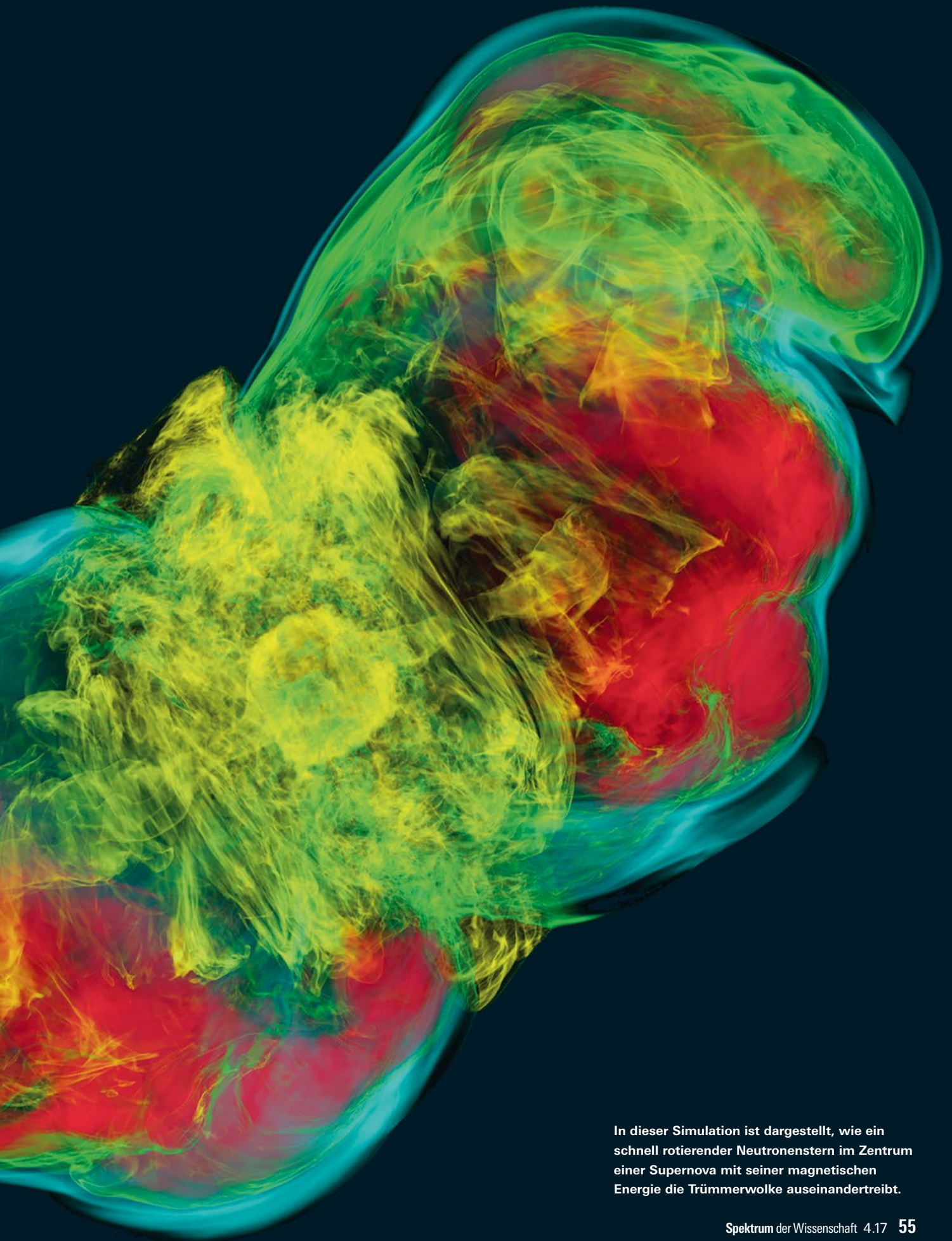
Jahr für Jahr beobachten Astronomen Tausende von höchst unterschiedlichen Sternexplosionen. Nicht zuletzt sind solche Supernovae für das Entstehen schwerer Elemente wie Kalzium und Gold verantwortlich. Welche astrophysikalischen Prozesse stecken dahinter?



Daniel Kasen ist Astrophysiker an der University of California in Berkeley sowie am Lawrence Berkeley National Laboratory. Er entwickelt sowohl theoretische als auch Computermodelle, um die vielen Arten von Sternexplosionen zu erklären.

» [spektrum.de/artikel/1432748](https://www.spektrum.de/artikel/1432748)





In dieser Simulation ist dargestellt, wie ein schnell rotierender Neutronenstern im Zentrum einer Supernova mit seiner magnetischen Energie die Trümmerwolke auseinandertreibt.

Die Ruhe des Nachthimmels trägt – sie enthält uns die dynamische und oft spektakuläre Seite des Kosmos vor. Denn irgendwo im beobachtbaren Universum stirbt im Mittel pro Sekunde ein Stern: durch den Zusammenstoß mit einem anderen, durch die Explosion als Supernova oder durch den Kollaps zu einem Schwarzen Loch.

Hinweise auf solche Vorgänge im Kosmos kennt die Menschheit seit Jahrhunderten. Doch lange fehlten ihr die geeigneten Werkzeuge, um sie zu untersuchen. So beobachteten etwa chinesische Astronomen im Jahr 1006 einen »Gaststern«, der mehrere Wochen lang mit bloßem Auge sichtbar war und dann wieder verschwand. Der dänische Astronom Tycho Brahe berichtete von einem ähnlichen Ereignis 1572, ebenso Johannes Kepler 30 Jahre später. Heute wissen wir, dass es sich bei diesen Erscheinungen um Sternexplosionen handelte. Solche Supernovae können heller aufleuchten als eine Milliarde Sonnen auf einmal. Da sie allerdings meist in sehr großer Entfernung stattfinden, erscheinen sie uns lediglich als schwaches Lichtpünktchen und sind daher leicht zu übersehen.

Die moderne Technik revolutioniert derzeit die Erforschung des dynamischen Universums. Neue Teleskope, die mit hochauflösenden Digitalkameras ausgestattet sind, überwachen automatisiert regelmäßig große Himmelsareale und registrieren dabei jede Auffälligkeit am Firmament. Mit Hilfe von Software zur Bildverarbeitung und Mustererkennung entdeckten Astronomen im Verlauf der vergangenen Dekade jährlich Tausende neuer Sternexplosionen. Mittlerweile finden sie in einer Woche so viele wie im gesamten 20. Jahrhundert.

Dabei tauchen auch immer neue, bizarre Arten von Sternexplosionen auf. Manche von ihnen sind 100-mal heller als gewöhnliche Supernovae, andere wiederum 100-mal schwächer. Einige erscheinen tiefrot, manche senden vor allem ultraviolette Strahlung aus. Eine ganze Reihe davon ist jahrelang sichtbar, andere verblassen innerhalb

weniger Tage. Der Tod von Sternen ist damit erheblich vielfältiger, als Forscher früher dachten.

Und immer noch versuchen die Astronomen herauszufinden, was vor allem die exotischen Ausnahmen unter den Sternexplosionen auslöst und ihnen ihre spezifische Signatur verleiht. Dadurch wollen sie mehr über das Leben und Sterben der Sterne lernen, aber auch über die Physik der Materie bei extremer Temperatur, Dichte oder Schwerkraft.

Zudem erfahren wir von Supernovae etwas über unsere eigenen Ursprünge. Denn bis auf die leichten Elemente Wasserstoff und Helium, die sich bereits kurz nach dem Urknall bildeten, entstanden alle anderen Atome, die für uns wichtig sind – ob Kalzium in unseren Knochen oder Eisen in unserem Blut –, im Wesentlichen durch Kernfusion in den Sternen. Früher dachten die Forscher, dass normale Supernovae sämtliche, auch die allerschwersten Elemente hervorbringen. Aber die mittlerweile beobachtete Vielfalt an Sternexplosionen deutet darauf hin, dass deren unterschiedliche Kategorien bevorzugt Elemente verschiedener Bereiche des Periodensystems produzieren.

Stellare Katastrophen

Wie kommt es zu einer Supernova? Ein Stern ist eine Art stabiler Kernfusionsreaktor: Die eigene Schwerkraft hält die gewaltige Plasmakugel zusammen; die bei der Fusion im Inneren erzeugte Energie sorgt für den notwendigen Gegendruck zur Gravitation. Bei einer Supernova-Explosion bricht dieses Kräftegleichgewicht auf chaotische Weise zusammen – die Schwerkraft siegt über die Kernfusion oder umgekehrt.

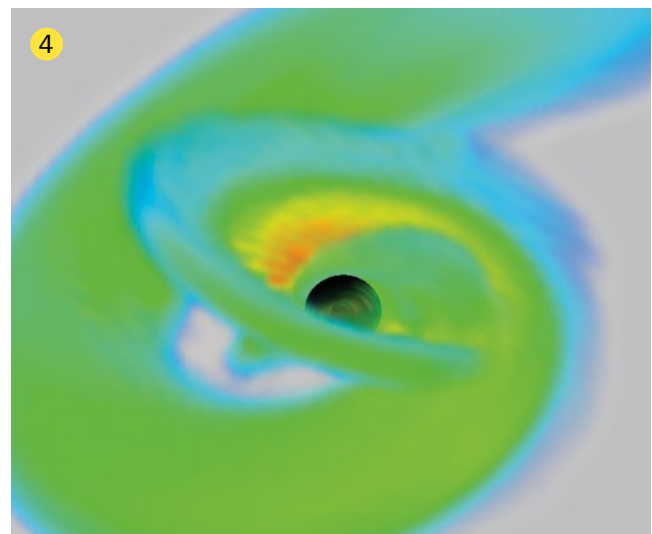
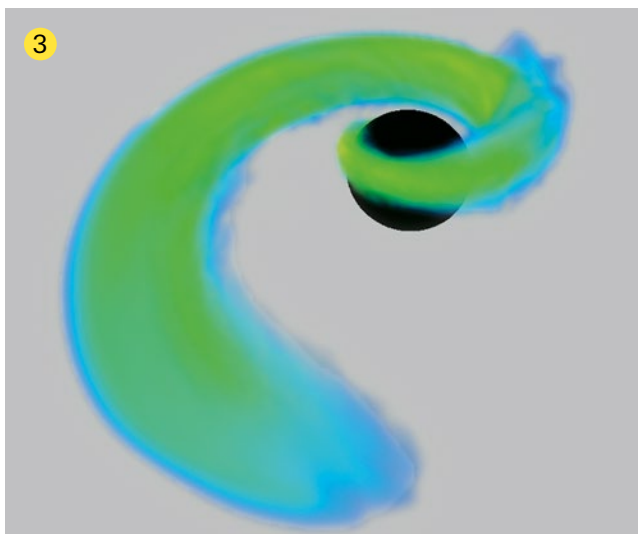
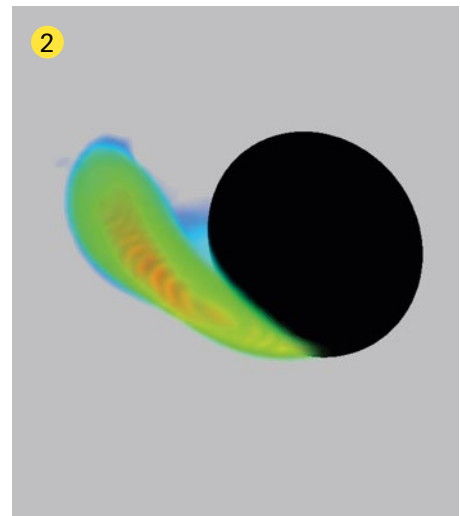
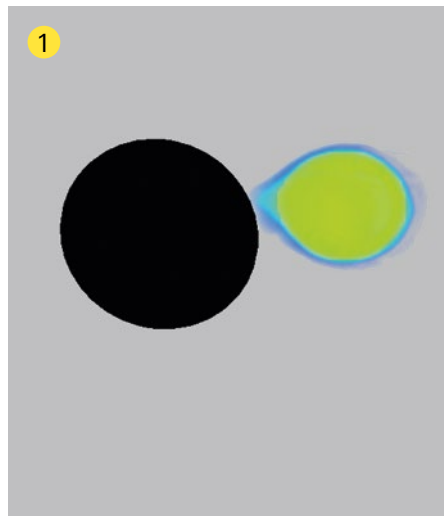
Die häufigste Art von Supernovae tritt bei Sternen mittlerer Größe mit mindestens der zehnfachen Sonnenmasse auf. Sie fusionieren zunächst über Millionen von Jahren stetig Wasserstoff zu schwereren Elementen. Haben sie alle Materie in ihrem Zentrum bis zum Eisen verbrannt, kommt die Kernfusion zum Erliegen. Denn noch schwerere Elemente zu erzeugen, ist energetisch ungünstig: Um die Kernbausteine zusammenzuführen, müsste mehr Energie aufgewendet werden, als der Fusionsprozess freisetzen würde. Die Temperatur und damit der Druck im Sterninneren sinken, und der Kern des Sterns kollabiert unter seiner Schwerkraft. Dabei verdichtet er sich millionenfach und verwandelt sich in einen Neutronenstern. In einem solchen Objekt ist die Masse der Sonne in einer wenige Kilometer durchmessenden Region zusammengepresst.

Der Kollaps setzt so viel Energie frei, als würde unsere Sonne ihren auf zehn Milliarden Jahre ausgelegten Vorrat an fusionsfähigem Wasserstoff innerhalb nur weniger Sekunden verbrennen. Diese enorme Energiemenge hat die Einheit Bethe, benannt nach dem Nobelpreisträger Hans Bethe. Die Druckwelle der Explosion breitet sich in der Sternhülle mit Überschallgeschwindigkeit aus und hinterlässt ein Gemisch an frisch fusionierten schweren Elementen, darunter Silizium, Kalzium, Eisen und radioaktive Isotope von Nickel, Kobalt und Titan. Innerhalb von Minuten fliegen die stellaren Überreste auseinander. Die Wolke aus nuklearer Asche breitet sich mit der Geschwin-

AUF EINEN BLICK SCHMIEDE DER ELEMENTE

- 1 Dank automatisierter Durchmusterungen des Himmels haben Forscher in den letzten Jahren eine Vielzahl exotischer Supernovae entdeckt. Manche davon leuchten 100-mal heller als gewöhnliche.
- 2 Mit verschiedenen Modellen versuchen sie, diese Phänomene zu erklären. Eine zentrale Frage dabei ist, welche Prozesse die schweren Elemente hervorbringen, ohne die es weder uns noch Planeten gäbe.
- 3 Künftige Beobachtungen sollen dabei helfen, die grundlegenden Mechanismen von Sternexplosionen zu klären – und damit auch deren Einfluss auf die Entstehung von Leben.

Die Simulation zeigt die Verschmelzung eines Neutronensterns (grün) mit einem Schwarzen Loch. Der Vorgang ähnelt der Verschmelzung zweier Neutronensterne – ein solches Szenario könnte die Ursache für ungewöhnlich schwach leuchtende Supernovae sein. Die Schwerkraft des Schwarzen Lochs deformiert zunächst den Neutronenstern (1 und 2). Sie zieht ihn zu einem langen Schweif auseinander (3), bis er sich ganz um das Schwarze Loch herumwickelt (4). Am Ende verschluckt das Schwarze Loch fast die gesamte Materie des Neutronensterns.



MIT FROIL. GEN. VON FRANCOIS FOUICART, LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY UND UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY

digkeit von rund 30 Millionen Kilometern pro Stunde, also einigen Prozent der Lichtgeschwindigkeit aus.

Würde unsere Sonne als Supernova explodieren, würde zunächst ein intensiver Röntgenblitz alles Leben auf der Erde mit einem Schlag auslöschen. Die solare Trümmervolke wüchse innerhalb weniger Minuten auf das Doppelte an; sie würde 1000-mal heller strahlen als die heutige Sonne. Nach einigen Stunden würde die Wolke die Erde verschlingen, einen Tag später Jupiter und Saturn. Nach ein paar Wochen hätte sich die solare Asche über das ganze Sonnensystem ausgebreitet. Dann würde die Wolke schließlich transparent, und eine gewaltige Strahlungsflut würde sich ins All ergießen: Die Supernova erreichte ihre maximale Helligkeit, die dem Milliardenfachen der Sonnenleuchtkraft entspricht, bevor sie langsam wieder verlösche. Tatsächlich wird unsere Sonne ein weniger spektakuläres Schicksal ereilen. Wegen ihrer verhältnismäßig geringen Masse wird sie sich in einen Roten Riesen und später in einen Weißen Zwerg verwandeln.

Astronomen gelingt es fast nie, den kurzen Röntgenausbruch einer Supernova einzufangen. Auch finden sie nur selten ein Archivbild des Sterns vor seiner Zerstörung.

Meist sehen sie nur die Folgen der Explosion: eine große expandierende Wolke radioaktiver Trümmer, die über Wochen hinweg sichtbar ist. Anhand dieser Beobachtungen versuchen sie herauszufinden, was für ein Stern explodierte – und warum das geschah.

Extrem selten: Sternzerstörung durch Teilchen-Antiteilchen-Paarerzeugung

Unter den jüngst aufgespürten seltsamen Supernovae zählen die so genannten Ultranovae zu den dramatischsten Ereignissen. Sie sind mehr als 100-mal heller als gewöhnliche und lassen sich fast bis ans Ende des Universums beobachten. Aber sie sind ausgesprochen selten: Auf 1000 normale Supernovae kommt vielleicht eine einzige Ultranova. Bisher haben die Astronomen keinerlei schlüssige Erklärung für ihre extreme Helligkeit, doch es gibt drei favorisierte Theorien.

Nach dem Modell der Paar-Instabilitäts-Supernova steigt die Temperatur in besonders massereichen Sternen zwischen 150 und 250 Sonnenmassen so sehr an, dass sie in ihrem Kern in großen Mengen Teilchen-Antiteilchen-Paare erzeugen, und zwar Elektronen und Positronen. Das

kostet aber viel Energie. Dadurch fällt der nach außen gerichtete Strahlungsdruck ab, und der immer noch aus fusionsfähigem Material bestehende Kern des Sterns kollabiert vorzeitig. Die nukleare Fusion gerät außer Kontrolle, alle Materie verbrennt nahezu auf einen Schlag. Der Energieausbruch von etwa 100 Bethe kehrt den Kollaps um und zersprengt den Stern vollständig. Keinerlei Überreste bleiben zurück.

Die hierbei entstehende Trümmerwolke wäre 1000-mal radioaktiver als jene einer normalen Supernova. Da diese Wolken zudem vermutlich extrem massereich

Bricht das Kräftegleichgewicht auf chaotische Weise zusammen, siegt die Schwerkraft über die Kernfusion – oder umgekehrt

und undurchsichtig sind, dauert es mindestens ein Jahr, bis das Licht der Explosion aus ihnen hervorbricht. Das Nachglühen solcher Paar-Instabilitäts-Supernovae sollte extrem hell sein und lange andauern. Einige der kürzlich entdeckten Ultranovae besitzen genau diese Eigenschaften. Daher folgern manche Astronomen, dass wir hier Zeugen der Zerstörung von Riesensternen durch Teilchenpaare sind. Andere Forscher widersprechen dem jedoch. Ihrer Ansicht nach erklären andere Theorien die Beobachtungen besser.

Ein alternatives Szenario sieht etwas masseärmere Sterne zwischen 70 und 150 Sonnenmassen als Ursache der Ultranovae. Solche Sterne könnten zwar auf ähnliche Weise instabil werden wie ihre gewichtigeren Gegenspieler, jedoch mit weniger gravierenden Folgen. Wenn so ein Stern zu kollabieren beginnt und die Kernfusion im Zentrum weiter anheizt, könnten die äußeren Schichten noch zurückfedern und expandieren. Das dämmt die nuklearen Reaktionen wieder ein, bevor sie ganz außer Kontrolle geraten. Dennoch dürfte der Stern dabei einen großen Teil seiner äußeren Schichten ins All blasen und könnte so eine schwächer leuchtende Supernova vortauschen.

Möglicherweise durchlaufen Sterne in diesem Massenbereich mehrere solcher Ausbrüche, bevor sie ihren nuklearen Vorrat endgültig verbraucht haben und als normale Supernova explodieren. Die Trümmerwolke prallt dann auf das Hüllenmaterial, das der Stern bereits früher ausgestoßen hat. Dabei entsteht ein extrem helles Feuerwerk, mit dem sich wiederum bestimmte Ultranova-Erscheinungen erklären ließen.

Im Jahr 2009 stießen Astronomen auf eine zwar etwas leuchtschwache, aber sonst normal wirkende Supernova. Das unter der Bezeichnung SN2009ip registrierte Objekt verblasste innerhalb weniger Wochen und geriet weitgehend in Vergessenheit. Überraschenderweise tauchte ein Jahr später an derselben Stelle erneut eine leuchtschwache Supernova auf. Offenbar war der Stern doch noch nicht tot. Inzwischen haben die Forscher 2012 einen

weiteren schwachen Ausbruch registriert – und dann, wenige Monate später, einen sehr hellen.

Einige Wissenschaftler glauben, der vorletzte Ausbruch sei der wahre Tod des Sterns gewesen. Der letzte, hellste stammt demnach vom Aufprall der Trümmerwolke der Supernova auf das bereits früher ausgestoßene Material. Anderen Forschern zufolge lebt der Stern noch, und es stehen noch weitere Eruptionen bevor.

In einem dritten Szenario schließlich ist weniger die Masse als vielmehr eine extrem rasche Rotation des Sterns verantwortlich für die gewaltige Leuchtkraft einer Ultranova. Sterne mit anfangs 10 bis 60 Sonnenmassen explodieren sehr wahrscheinlich als normale Supernova und enden als Neutronensterne. Doch wenn ein solcher Stern sich bereits sehr schnell dreht, kann die Rotation für den resultierenden Neutronenstern wegen der Drehimpulserhaltung bei rund 1000 Umdrehungen pro Sekunde liegen – allerdings nicht wesentlich höher, sonst würden Zentrifugalkräfte ihn zerreißen. In einem solchen kompakten Kreis sind enorme Mengen an kinetischer Energie gespeichert, die bis zu zehn Bethe entsprechen.

Wie aber könnte die Rotationsenergie eine Ultranova antreiben? Neutronensterne besitzen starke Magnetfelder, die diese Energie nach außen transportieren könnten. Dreht sich ein Magnet, so wickelt sich sein Feld auf. Dadurch wird ein Teil der Bewegungsenergie in Form elektromagnetischer Schwingungen abgestrahlt. Dieser Prozess könnte bei den Neutronensternen am Werk sein. Ein faszinierendes Beispiel dafür ist der Überrest einer im Jahr 1054 von chinesischen Astronomen beobachteten Supernova: der Krebsnebel. Das Licht, das wir heute von diesem Objekt empfangen, stammt von einem rotierenden Neutronenstern, der einen Wirbel aus magnetischem Plasma erzeugt. Im Verlauf von 1000 Jahren hat das aufgewickelte Magnetfeld dem Neutronenstern Rotationsenergie entzogen, das umgebende Gas aufgeheizt und zum Leuchten angeregt.

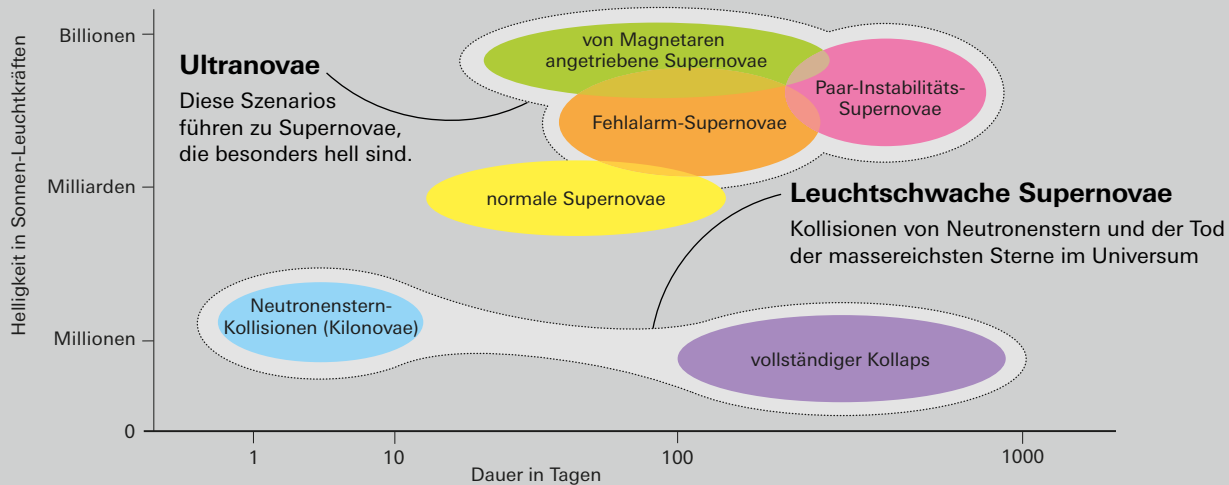
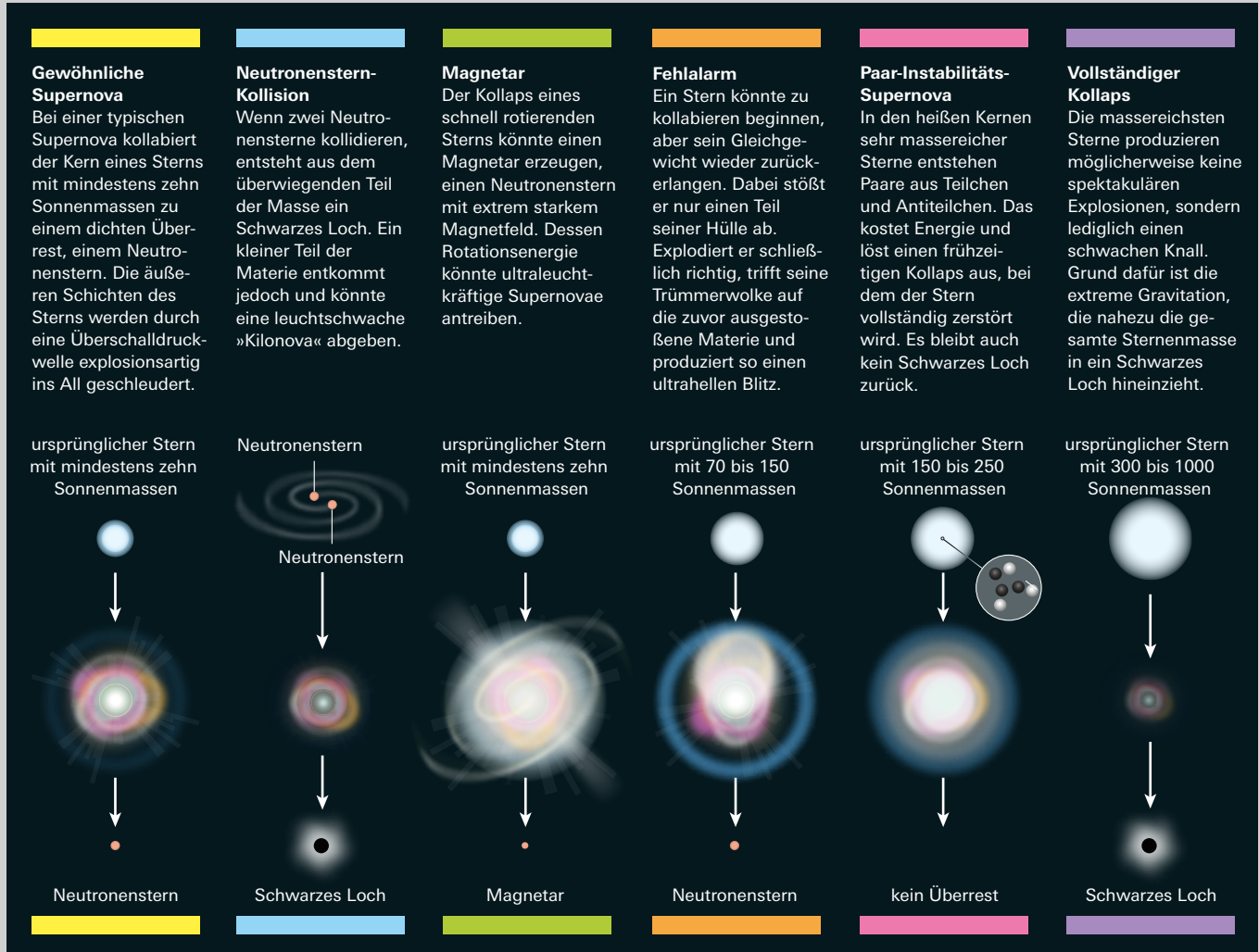
Der Tod der massereichsten Sterne ist überraschend unspektakulär

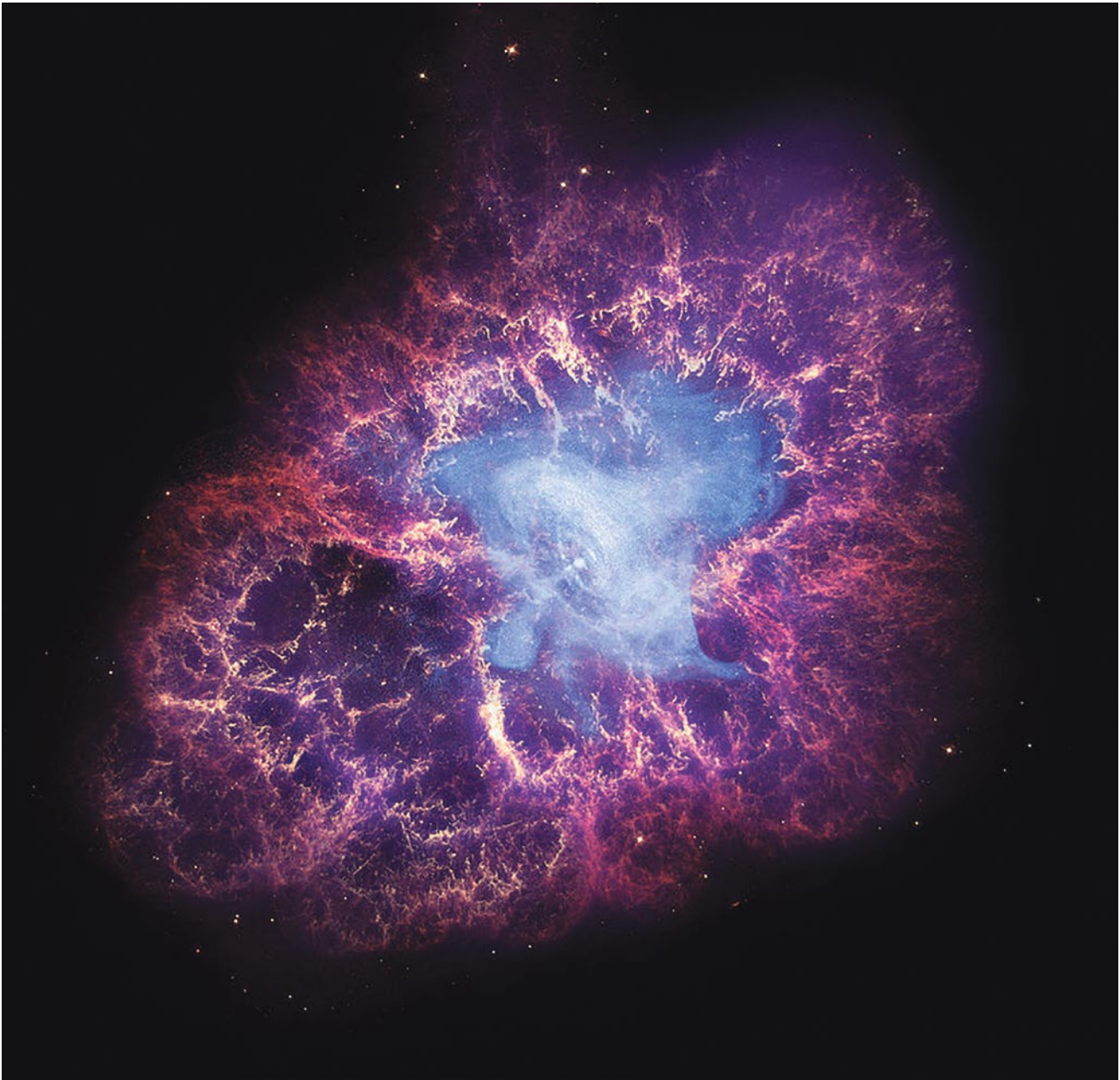
Vor fünf Jahren schlugen mein Kollege Lars Bildsten von der University of California in Santa Barbara und ich vor, ein ähnlicher Prozess könne die große Leuchtkraft der Ultranovae erklären. Dazu müsste der Neutronenstern ein Magnetfeld besitzen, das 100- bis 1000-mal stärker ist als dasjenige des Krebsnebels, und zudem nahe an der Grenze zum Zerreißen rotieren. Dann könnte nahezu die gesamte Rotationsenergie innerhalb eines Monats abströmen und so die Trümmerwolke der Supernova eine Million Mal heller erstrahlen lassen als den Krebsnebel. Diese Zahlen mögen extrem erscheinen, aber wir haben bereits Neutronensterne mit vergleichbaren Magnetfeldern beobachtet (allerdings nicht im Supernova-Stadium). Solche Magnetare besitzen die stärksten Magnetfelder, die wir im gesamten Universum kennen.

Am entgegengesetzten Ende des Helligkeitsspektrums finden sich besonders unspektakuläre Supernova-Erscheinungen. Bei Weitwinkel-Durchmusterungen des Himmels stießen Astronomen auf Sternexplosionen,

Zoo der Supernovae

Supernovae künden vom Tod der Sterne. Die kosmischen Explosionen weisen eine sehr viel größere Vielfalt auf, als die Astrophysiker lange angenommen haben. Beobachtungen in jüngerer Zeit haben Supernovae aufgespürt, die 100-mal heller sind als üblich, andere wiederum leuchten um den gleichen Faktor schwächer. Theoretiker haben eine ganze Reihe von Modellen entwickelt, mit denen sie versuchen, einige dieser ungewöhnlichen Eruptionen zu erklären.





Den Supernova-Überrest des Krebsnebels bringt vermutlich ein schnell rotierender Neutronenstern in dessen Zentrum zum Leuchten. Dieser erzeugt einen Wirbel aus magnetisiertem Plasma (künstlerische Darstellung).

die 100-mal schwächer leuchten als gewöhnliche. Noch streiten die Forscher über die möglichen Ursachen für diese Phänomene. Die meisten vermuten jedoch, dass es sich zumindest bei einigen von ihnen um die letzten Regungen der massereichsten Sterne handelt, die es jemals im Kosmos gab.

Wir wissen nicht, wie viel Masse ein Stern maximal besitzen kann, möglicherweise durchaus die 300- oder gar 1000-fache unserer Sonne. Wider Erwarten verursachen diese Giganten aber nicht die gewaltigsten Supernova-Explosionen. Stattdessen ist vielleicht genau das Gegenteil der Fall. Denn die Gravitation solcher Sterne ist so stark, dass sie am Ende ihres Lebens vollständig zu einem Ob-

jekt kollabieren, das noch dichter ist als ein Neutronenstern: zu einem Schwarzen Loch.

Theoretische Modelle zeigen, dass der größte Teil der Sternmasse in einem solchen Schwarzen Loch verschwindet. Die automatische Suche nach solchen Ereignissen funktioniert genau umgekehrt wie die Suche nach Supernovae. Die Instrumente halten hierzu nicht nach einem plötzlich aufleuchtenden Objekt Ausschau, sondern nach einem hellen Stern, der auf einmal verschwindet.

Obwohl sie nicht explodieren, könnten einige dieser Megasterne am Ende ihre Lebens doch noch einmal ein wenig aufflackern. Ihre Kerne sind manchmal von dünnen Halos aus Wasserstoffgas umgeben. Wenn der Hauptteil

des Sterns ins Schwarze Loch gesogen wird, könnte sich dieser Gashalo aufheizen, ins All geblasen werden und so ein schwaches Leuchten erzeugen. Der Tod eines extrem großen Sterns würde also ironischerweise eine von außen betrachtet bemerkenswert schwach leuchtende Supernova produzieren.

Weitere ungewöhnlich schwache Eruptionen könnten von einer anderen Art Extremereignis stammen, nämlich der Kollision von Neutronensternen. Massereiche Sterne entstehen häufig als sich gegenseitig umkreisende Paare. Die einzelnen Objekte explodieren dann nacheinander als Supernova. Wenn das Paar dabei nicht auseinanderfliegt, bleibt ein Doppelsystem zurück; entweder zwei Neutronensterne, ein Neutronenstern und ein Schwarzes Loch oder zwei Schwarze Löcher. Mit der Zeit nähern sich die beiden Objekte auf einer Spiralbahn einander

Wahrscheinlich wird sich das Universum als seltsamer erweisen als gedacht und mit noch exotischeren Phänomenen aufwarten

langsam an, bis sie schließlich miteinander kollidieren und zu einem einzigen Schwarzen Loch verschmelzen. Von einem solchen Prozess zeugen die unlängst entdeckten Gravitationswellen. Vereinigen sich Neutronensterne, verschwinden Berechnungen zufolge 99 Prozent der Materie im Schwarzen Loch; das restliche Prozent, das aus der äußeren Schicht der Sterne stammt, wird ins All katapultiert.

Dabei handelt es sich wahrscheinlich um einen See aus freien Teilchen: hauptsächlich Neutronen, aber auch Protonen und Elektronen. Wenn sich dieses Gas ausdehnt, verbinden sich die Teilchen zu schwereren Atomkernen. Die Protonen stoßen sich zwar auf Grund ihrer positiven elektrischen Ladung zunächst gegenseitig ab, aber die ungeladenen Neutronen binden sich leicht an sie. Durch progressiven Neutroneneinfang bilden sich immer schwerere Kerne. Es entstehen Elemente aus der unteren Hälfte des Periodensystems wie Gold, Platin und Quecksilber, gut durchmischt mit radioaktiven Produkten wie Uran und Thorium. Vermutlich ist die Kollision von Neutronensternen eines der wenigen Ereignisse im Kosmos, aus denen solche schweren Elemente überhaupt hervorgehen.

Dabei sollten die radioaktiven Elemente die Trümmerwolke wie eine Supernova aufglühen lassen. Da es sich jedoch um relativ wenig Masse handelt, dürfte sie lediglich ein Prozent der Leuchtkraft einer normalen Supernova besitzen und zudem nur wenige Tage leuchten. Jüngste theoretische Arbeiten, die ich gemeinsam mit meiner Studentin Jennifer Barnes an der University of California in Berkeley durchgeführt habe, deuten darauf hin, dass die ungewöhnliche Konzentration an schweren Metallen in solchen Wolken den schwachen Supernovae eine charakteristische Farbe verleiht: entweder ein tiefes Rot oder gar

Infrarot. Wir bezeichnen solche leuchtschwachen Explosionen als Kilonovae.

Möglicherweise haben Astronomen sogar unlängst erstmals den radioaktiven roten »Rauch« einer Kollision von Neutronensternen beobachtet. Im Juni 2013 alarmierte sie ein kurzer Schauer von Gammastrahlen. Als Ursache dafür kam eine nahe gelegene Verschmelzung von Neutronensternen in Frage. Die Forscher richteten das Weltraumteleskop Hubble auf die entsprechende Himmelsposition und fingen ein kurzes infrarotes Aufglühen ein. Wenige Wochen später war es wieder verschwunden. Zwar ist die Datenlage spärlich, sie passt aber zu den theoretischen Vorhersagen für eine Kilonova. Ist diese Interpretation korrekt, haben wir hier das erste Mal die Produktion schwerer, wertvoller Metalle beobachtet. Um den Anteil der Metalle, die bei solchen Explosionen entstehen, besser bestimmen zu können, müssten wir mehr Ereignisse dieser Art registrieren. Dann könnten wir vielleicht die Frage beantworten, ob derartige Explosionen die gesamte Menge an Gold, Platin und anderen schweren Elementen im Kosmos erklären können oder nur einen Teil davon.

Unser exotischer Kosmos

Die Erforschung des dynamischen Universums hat gerade erst begonnen. Innerhalb der nächsten zehn Jahre werden neue Teleskope wie beispielsweise die Zwicky Transit Facility nahe San Diego, das Large Synoptic Survey Telescope in Chile und das von der NASA geplante Wide-field Infrared Survey Telescope in Betrieb gehen. Diese Instrumente werden in der Lage sein, alle paar Nächte den größten Teil des Himmels abzuscannen und dabei wesentlich mehr Supernovae zu entdecken, als es mit den derzeitigen Instrumenten möglich ist. Zudem sind moderne Supercomputer inzwischen im Stande, detaillierte dreidimensionale Simulationen dieser Ereignisse durchzuführen. Sie versetzen uns damit in die Lage, zu visualisieren, was tief in den Kernen explodierender Sterne vor sich geht.

Die Daten, die wir in den kommenden Jahren voraussichtlich sammeln, werden unsere Theorien über die vielen unterschiedlichen Arten des Sternentods auf den Prüfstand stellen. Jedes der hier beschriebenen Szenarien ist plausibel, aber keineswegs bewiesen. Mit neuen Beobachtungen ungewöhnlicher Supernovae hoffen wir herauszufinden, welche dieser Arten für Sternexplosionen in der Natur tatsächlich existieren. Wahrscheinlich wird sich das Universum einmal mehr als noch seltsamer erweisen als gedacht und mit weiteren unerwarteten exotischen Phänomenen aufwarten. ◀

QUELLEN

Barnes, J., Kasen, D.: Effect of a High Opacity on the Light Curves of Radioactively Powered Transients from Compact Object Mergers. In: *Astrophysical Journal* 775, 2013

Kasen, D., Bildsten, L.: Supernova Light Curves Powered by Young Magnetars. In: *Astrophysical Journal* 717, S. 245–249, 2010

Mauerhan, J. C. et al.: The Unprecedented 2012 Outburst of SN 2009ip: A Luminous Blue Variable Star Becomes a True Supernova. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 430, S. 1801–1810, 2013

TECHNIKGESCHICHTE

KARL DRAIS – DAS VERGESSENE GENIE

Das Zweirad galt lange als Kind vieler Väter und Nationen. Der Entwickler der badischen Laufmaschine rangierte in dieser Liste als Außenseiter. Ein Fehler, wie zeitgenössische Quellen zeigen.



Der habilitierte Physiker **Hans-Erhard Lessing** war in der Laserforschung tätig, bevor er sich der Technikgeschichte zuwandte. Er wies als Erster auf den Zusammenhang von der Klimakatastrophe von 1816 und 1817 und der Erfindung des Zweirads hin und entdeckte Drais' Adelsverzicht 1849. Lessing war Hauptkonservator des Karlsruher Zentrums für Kunst und Medien, zuvor am Mannheimer Technoseum.

» spektrum.de/artikel/1438961

Das Zweiradprinzip markiert den Beginn des mechanisierten Individualverkehrs. Ein Vorbild in der Natur gab es dafür nicht – das Pferd als bis dahin wichtigstes Medium persönlicher Mobilität bewegt sich auf ganz andere Art vorwärts. Die oft unterschätzte Basisinnovation versetzte die Menschen in einen neuen Erfahrungsraum: das labile Gleichgewicht auf zwei Rädern hintereinander, das ständig aufrechterhalten werden musste. Heutzutage gehört diese Art von Fahrzeug zu unserem Alltag, und es mag uns deshalb zunächst nicht in den Sinn kommen, doch in dieser steten Balance kommt man dem Fliegen nahe. Mit seiner Erfindung rangiert Karl Drais (1785–1851) daher auf Augenhöhe mit Pionieren der Luftfahrt.

Um die neue Fertigkeit auf breiter Basis zu erlernen, brauchte die Menschheit dann 50 Jahre, fast ebenso lang, wie die Entwicklung von Ottos Lilienthals Gleitflugzeug bis zu den Hanggleitern der Nachkriegszeit in Anspruch nahm. Das Fahrrad diente zudem als Testplattform für Entwicklungen zur Fahrphysik. Amerikanische Forscher wie der Automobilhistoriker James J. Flink, Emeritus der University of California in Irvine, verstehen das Automobil daher als Erben des Fahrrads: »Keine vorherige technische Innovation – nicht einmal der Verbrennungsmotor – war für die Entwicklung des Automobils so wichtig wie das Fahrrad.« Und dass die Brüder Wilbur und Orville Wright (1867–1912 beziehungsweise 1871–1948) im Hauptberuf zunächst Zweiräder fertigten, ist ein Indiz für die Bedeutung dieser Technologie für die frühe Luftfahrt.

Daher ist es eigentlich unverständlich, warum Drais bis vor wenigen Jahren nicht im Erfinder-Olymp gesehen, sondern häufig geradezu abfällig beurteilt wurde. Er sei »kauzig« gewesen, habe das Wenige bis zum »ersten

SCHWERPUNKT 200 Jahre Zweirad

Teil 1 / Seite 62

Karl Drais – das vergessene Genie
Hans-Erhard Lessing

Teil 2 / Seite 68

Vom Adelspielzeug zum Massenverkehrsmittel
Thomas Kosche

Teil 3 / Seite 74

Konkurrenzlos sparsam
Hans-Joachim Schlichting

richtigen« Fahrrad zu erfinden versäumt und sein Fahrzeug einer widerstrebenden Mitwelt förmlich aufnötigen müssen. Überhaupt habe er gar nicht das Zweirad, sondern nur die Lenkung dafür erfunden. Bei dieser Sachlage leistete die International Cycling-History Conference, die seit einem Vierteljahrhundert jährlich in einem anderen Land tagt, ganze Arbeit: Zunächst entlarvte sie den Prioritätsschwindel der anderen Zweiradnationen, dann stellte sie die innerhalb der Technikgeschichte vernachlässigte Fahrradgeschichte auf die Basis neuer Quellenforschung. Seither gilt Karl Drais unbestritten als Urheber dieser Innovation.

Er wurde als Reichsfreiherr von Sauerbronn 1785 in der badischen Residenzstadt Karlsruhe geboren. Die Zeiten waren kriegerisch: Nach der aus Brotunruhen entstandenen Französischen Revolution von 1789 überfielen französische

sische Truppen die Nachbarländer. Schon beim Besuch des Lyzeums dürfte sich die technische Begabung des Jungen gezeigt haben. Wohl aus diesem Grund befreite ihn der Vater vom Lateinunterricht und ließ ihn nach drei Jahren einen Realschulabschluss machen. Vielleicht weckte Schulleiter Johann Lorenz Böckmann das Interesse des Knaben für Naturwissenschaft, denn er verwaltete auch das physikalische Kabinett des regierenden Markgrafen Karl Friedrich von Baden (1728–1811) und experimentierte mit optischen Telegrafen.

Beamtenadel ohne Vermögen

Womöglich diente auch der vielseitige Benjamin Thompson, Graf Rumford (1753–1814) als Vorbild. Der Physiker und Erfinder wirkte zu jener Zeit in München, wo er als Minister das Vertrauen des bayrisch-pfälzischen Kurfürsten Karl Theodor (1724–1799) genoss. Seine Sozialreformen wurden andernorts in Verwaltungskreisen diskutiert. Zur Speisung der Armen hatte Graf Rumford einen preiswerten, aber nahrhaften Eintopf ersonnen, außerdem einen Herd mit geringerem Brennstoffbedarf. Nach gleichem Muster ließ Karl Drais' Vater für die Bedürftigen in Karlsruhe eine Suppenküche bauen.

Graf Rumford konnte seine Wissenschaft stets finanzieren, durch herrschaftliche Unterstützung und zweimal

durch Heirat mit steinreichen Witwen. Dieser Weg blieb dem jungen Drais verschlossen, da sein Vater unter Epilepsie litt: Die Krankheit galt als vererblich und stand deshalb einem Aufstieg durch Eheschließung im Weg. Die Draisens blieben Beamtenadel ohne Grundbesitz, und so musste sich Karl eine Anstellung bei Hof suchen.

Den Beruf bestimmte sein Taufpate Karl Friedrich von Baden: Der junge Drais sollte in den Forstdienst. Doch dank eines Bewerberstaus dort konnte er 18-jährig ein Studium bei den Technologen der Universität Heidelberg einschleichen, im 18. Jahrhundert Lehrfach für Steuerbeamte, aus dem später die Volkswirtschaft entstand. Nunmehr überqualifiziert, unterrichtete er in der Forstlehranstalt des Onkels und erreichte noch den Status eines Forstmeisters ohne Amt. Doch an seiner ersten Arbeitsstelle behandelte man ihn wie einen Praktikanten. Hoffnungen, an der Heidelberger Universität oder beim Mustergut Hofwil in der Schweiz unterzukommen, zerschlugen sich. Immerhin wurde er auf Antrag seines Vaters bei vollen Bezügen beurlaubt. Derart finanziell abgesichert, konnte er sich in Mannheim als Erfinder versuchen, einer in vorindustrieller Zeit eher brotlosen Kunst.

Der Tod seines Taufpaten beendete Karl Drais' Aussicht auf Verwendung bei Hof; aber er feierte erste Erfinderefolge. Die Erweiterung der so genannten hohlfeldschen



Den militärischen Nutzen seiner Laufmaschine illustrierte Drais 1817 in diesem Kupferstich durch die Vision eines Stabsmelders – zu jener Zeit gab es solche Boten beim Heer noch nicht.

MIT FROL. GEN. VON HANS-ERHARD LESSING

Musikmaschine um die Aufzeichnung der Lautstärke wurde im »Badischen Magazin« veröffentlicht. Damit zählt Drais zu den Vordenkern des edisonschen Phonographen. Bei der Umstellung der badischen Maße auf das aus Paris übernommene dekadische System publizierte der Leibniz-Jünger Drais flugs das Büchlein »Dyadik« über das binäre System mit einem Algorithmus für binäres Quadratwurzeln ziehen.

Diese beruflichen Entwicklungen vollzogen sich vor dem Hintergrund einer immer dramatischeren Landwirtschaftskrise. Während der Napoleonischen Kriege hatten die durchziehenden Heere die Hafervorräte der Bauern bereits dezimiert, nun kam im Herbst 1812 eine Missernte hinzu, der noch vier weitere folgten. Der für den Pferdeverkehr und damit das Transportwesen jener Zeit wichtige Haferpreis zog an.

Vor seinem Studium hatte Karl im Schloss Schwetzingen den vierrädrigen »Gartenphaeton« sehen oder sogar fahren können, bevor dieser an den Hof nach München verfrachtet wurde (die rechtsrheinische Kurpfalz war bis 1803 bayrisches Gebiet und fiel dann an Baden). Dieses schöne, 1775 von einem Londoner Stuhlmacher gefertigte Stück sollte Pferdeexkrementen auf den gepflegten Schlossgartenwegen vermeiden helfen (siehe Bild rechts). Karls Interesse an der Fortbewegung durch Muskelkraft war bereits geweckt. Nun unterstrich der steigende Haferpreis die Notwendigkeit einer Alternative zum Zugpferd.

Den Gartenphaeton und ähnliche Fahrzeuge fand Karl zu kompliziert, zu reibungsträchtig und damit ineffizient. Eine Lösung schien ihm eine Tretmühle, die direkt auf der Hinterradwelle sitzen sollte. Drais besaß aber keine eigene Werkstatt, also musste er den Prototyp teuer bei einem Wagner in Auftrag geben. 1813 wurde seine vierrädrige »Fahrmaschine« gebaut, die in vielem noch dem Schwetzingener Vorbild ähnelte. Die Lenkung übernahm ein Fahrer vorn, während ein zweiter direkt in die Stufen oder Sprossen der Tretmühle trat – mit Blickrichtung nach hinten. Das ermöglichte eine Geschwindigkeit von »in einer Stun-

de zwei Stunden Wegs«, das entsprach wohl zwischen sechs und sieben Kilometern pro Stunde. Bis zu zwei Passagiere oder kleine Lasten sollten zusätzlich befördert werden können.

Vorfürungen in Karlsruhe vor der Herrscherfamilie und ihrem Besucher Zar Alexander waren erfolgreich, weniger dagegen Drais' Bitte um finanzielle Förderung und sein Gesuch um das Privileg, Lizenzen für den Bau im Großherzogtum verkaufen zu dürfen – Beamten waren kommerzielle Nebentätigkeiten prinzipiell untersagt.

Vergebliche Präsentation der Laufmaschine vor den Mächtigen der Welt

Immerhin schlug der Zar vor, die Fahrmaschine den auf dem Wiener Kongress versammelten Fürsten vorzuführen: 1814 und 1815 berieten die Vertreter von gut 200 europäischen Staaten in der Donaumetropole über die Zukunft des Kontinents nach dem Sieg über Napoleon. Schnell nahm Drais noch einen Umbau vor, bevor er sich auf die kostspielige Reise begab. Eine Kurbelwelle statt der Tretmühle zwischen den Hinterrädern erlaubte nun die Blickrichtung des Tretenden nach vorn. Sie belegt, dass Drais den Kurbelantrieb sehr wohl kannte und nutzte.

Da sein im »Neuen Magazin aller neuesten Erfindungen« eingereichter Artikel noch nicht erschienen war, ließ er für Wien einen Sonderdruck anfertigen. Darin machte er den Zusammenhang zwischen Hafer- und Pferdemangel und seinem Muskelkraftwagen als Zugpferdersatz deutlich: »In Kriegszeiten, wo die Pferde und ihr Futter oft selten werden, könnte ein solcher Wagen wichtig seyn.« Auf einem heute noch erhaltenen Exemplar hatte er handschriftlich vermerkt, man werde auf schlechten Wegen und in Bergen sehr müde, sei aber auf der Straße nach Heidelberg schneller gefahren als Pferde im Trab.

Der Tipp des Zaren erwies sich jedoch als nutzlos, weil die um die Länderaufteilung schachernden Fürsten ihre Feldzeugmeister nicht dabei hatten und diese über Angelegenheiten des Fuhrparks entschieden. Offenbar erschien den Fürsten der gestiegene Haferpreis nicht bedrohlich genug, um über Alternativen nachzudenken. Obendrein handelte sich Drais eine Abmahnung seines Dienstherrn ein, weil er in Uniform Vorfürungen gegen Eintritt durchgeführt hatte. Frustriert wandte er sich anderem zu – Erfindungen für Landvermesser und Treidelschiffer.

Doch die Haferkrise war nicht beigelegt, im Gegenteil. Die weltweite Klima- und Hungerkatastrophe, auch als Tambora-Kälte bezeichnet, ist erst in den letzten Jahrzehnten wieder in den Blickpunkt der Technikhistoriker gerückt, obwohl der Zusammenhang mit der Eruption des östlich von Bali gelegenen Vulkans Tambora im Jahr 1815 bereits Anfang des 20. Jahrhunderts erkannt wurde. Dass das »Jahr ohne Sommer« 1816 mit Schneefällen und Dauerregen, mit Ernteausfall, Hungersnot, Viehsterben und Auswanderung derart in Vergessenheit geraten konnte, liegt unter anderem an der Quellenlage: Wegen der üblichen Vor- und Nachzensur durften Zeitungen allenfalls über Marktpreise, nicht aber über die Notsituation berichten. Beispielsweise wurde in britischen Zeitungen, jedoch nicht in deutschen über Brotunruhen in Frankreich berich-

AUF EINEN BLICK LAUFMASCHINE STATT PFERD

- 1** Der dem badischen Beamtenadel angehörende Karl Drais präsentierte 1813 der Herrscherfamilie und Zar Alexander einen mit Muskelkraft betriebenen Wagen. 1817 folgte eine zweirädrige Laufmaschine.
- 2** Einer These des Autors zufolge motivierten massive Ernteeinbrüche die Erfindung: Das Zweirad sollte das auf Hafer angewiesene Reitpferd als Beförderungsmittel ersetzen.
- 3** In der Badischen Revolution 1848/49 stand Drais auf Seiten der Demokraten. Monarchisten zerstörten deshalb seinen Ruf, und er geriet als Erfinder des Zweiradprinzips in Vergessenheit.



Vermutlich inspirierte der »Gartenphaeton« Drais zu seiner Erfindung. Das von einem Bediensteten angetriebene Fahrzeug sollte Pferdeexkremente auf den Wegen des Schwetzingen Schlossparks (oben eine Ansicht um 1830) vermeiden.

MIT FRIEDRICH VON HANUS-ERHARD LESSING



tet, bei denen Mühlen und Bäckereien geplündert worden waren. Vermutlich sollte niemand zur Nachahmung ange-regt werden.

Wie es um die Pferde bei den hochgeschnellten Heu- und Haferpreisen bestellt war, lässt sich noch schwerer beurteilen, da ein Pferd als Sache gesehen wurde und nicht wie heute oft als Lebewesen mit Empfindungen. Im Rückblick berichteten einige Autoren, dass an diesem oder jenem Ort die hungernde Bevölkerung Pferde verzehrte. Ein allgemeines Pferdesterben (»mortalité des chevaux«) erwähnte immerhin der Finanzbericht der französischen Abgeordnetenkammer vom 23. 12. 1817 in einem Absatz über die Folgen der Klimakatastrophe. Mehr ins Detail ging ein Brief der Karlsruher Schriftstellerin Rahel Varnhagen von Ense, die 1817 einer Berliner Freundin schrieb: »Hungersnoth vor der Thür: Theuerung, die jeden geniert; solche Noth, daß man gar nichts anders hört, und es ein jeder hört; man es von einem jeden hört; einige Meilen von hier ißt man Brot aus Baumrinde, und gräbt todte Pferde aus.« Zwar gab es im Frühjahr 1817 wieder frisches Gras, doch die erkrankten Pferde vertrugen es nicht. Für die deutschen Staaten wurde für mehr als 200 Millionen Gulden Getreide aus Russland importiert und auf dem Schiffsweg über Rotterdam den Rhein heraufgebracht.

Das »Mannheimer Intelligenzblatt« war damals die einzige Zeitung in der Region, eine Information sucht man darin allerdings vergebens: die Ausfahrt der draisschen

Laufmaschine am 12. Juni. So blieb es dem »Badwochenblatt zum Nutzen und Vergnügen der Badegäste der Großherzogl. Stadt Baden« – heute Baden-Baden – vorbehalten, im Monat darauf die erste Zweiradfahrt zu dokumentieren. Sonst vor allem die Namen und Unterkünfte der wöchentlich angekommenen Badegäste präsentierend, enthielt es auch Anzeigen. Eine davon hatte Drais sicherlich selbst hineinsetzen lassen, nachdem er tags zuvor die Bergfahrt von Gernsbach nach Baden-Baden mit seiner »neuerfindenen Fahrmaschine LODA« – wohl eine Abkürzung aus den französischen Begriffen »locomotion« und »dada« – Fortbewegung und Steckenpferd – bewältigt hatte. Zur Unterscheidung vom vierrädrigen Vorgänger wählte er dann im Herbst die Bezeichnung »Laufmaschine« für sein Zweirad, während die Presse bald das kürzere »Draisine« wählte, das erst ab 1834 auch für ein Zweirad auf nur einer Eisenbahnschiene galt.

Vorbild Schlittschuhlauf

Wie der Erfinder dazu kam, die Zahl der Räder zu halbieren, wissen wir leider nicht. Er selbst äußerte dazu lediglich: »Die Hauptidee ist von dem Schlittschuhfahren genommen.« Tatsächlich gab es damals wohl kaum ein anderes Beispiel einer Fortbewegung, bei der es derart auf die Balance ankam. Das Laufen mit Kufen auf dem Eis war in Holland schon seit Jahrhunderten bekannt und nun in Deutschland vor allem in gehobenen Kreisen beliebt. Das

Balancieren auf zwei Rädern schien also einer im Übrigen eher unspornlichen Bevölkerung zumutbar.

Die gewählte Strecke war die Chaussee zwischen dem Schloss Mannheim und dem »Relaishaus« vor Schwetzingen, die beste Straße in der ganzen Gegend. Relaihäuser waren Pferdewechselstationen, die sich zwischen Ortschaften befanden. Die von Drais erwähnte Station lag auf halbem Weg vor Schwetzingen. Er selbst gab die Strecke mit vier Poststunden hin und zurück an. Wie man aus seinen Schriften weiß, entsprach eine Poststunde Weg zwei britischen Meilen, also 3,2 Kilometern, die gesamte Distanz Mannheim-Relaishaus-Mannheim damit 12,8 Kilometern. Dafür benötigte Drais nach eigener Angabe eine »kleine Stunde«. Anders als bei seiner Bergfahrt ab Gernsbach dürfte er demnach im Schnitt mit 13 bis 14 Kilometern pro Stunde unterwegs gewesen sein, deutlich schneller als eine Postkutsche mit ihren gut drei Kilometern pro Stunde!

Drais hatte demnach auf die Hungerkatastrophe reagiert und sich wieder dem Landverkehr zugewendet. Allerdings veröffentlichte er diesmal keinen Appell, dass eine solche Laufmaschine in Krisenzeiten wichtig sei. Entweder hielt er dies nicht mehr für nötig, oder die Herausgeber der Zeitungen weigerten sich, dergleichen zu drucken – der Zensor hätte die ganze Druckauflage konfisziert.

Aber auch ohne solche Begründung erkannten die Zeitgenossen die Vorteile. In Dresden etwa räsonierten die »Miscellen zur Belehrung und Unterhaltung« am 28. November 1817, als dank einer erfolgreichen Ernte die größte Not und diesbezügliche Zensur wohl vorbei war: »Da durch die Draisine manches, in der Anschaffung und Unterhaltung so kostspielige Reitpferd als entbehrlich dürfte abgeschafft werden, so stehet zu hoffen, daß der Hafer in Zukunft im Preise fallen werde.« Und in Frankreich schrieb der Comte de Ségur im »Journal de Paris« am 14. April 1818: »Der Wunsch, diese merkwürdigen Fuhrwerke zu

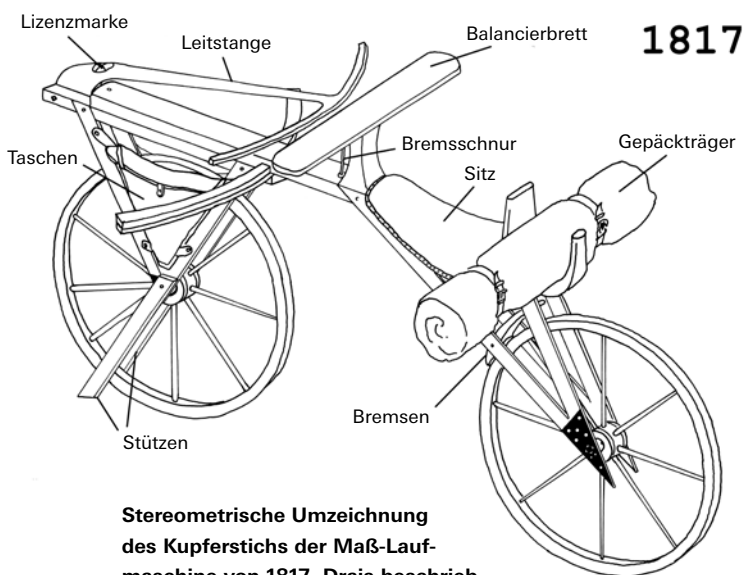
sehen, die den Luxus von Pferden abzuschaffen und den Hafer- und Heupreis zu senken gedacht sind, war das einzige Motiv meines langen Spaziergangs.« Das stärkste Indiz für den Zusammenhang ist aber der Zeitpunkt der beiden Erfindungen: nach dem ersten Haferpreisanstieg 1812 und dann wieder nach dem stärksten im Jahr 1816.

Hightechrad aus Eschenholz, so schwer wie ein heutiges Hollandrad

Die Nachricht von der Laufmaschine verbreitete sich rasch in Europa und erreichte sogar die Vereinigten Staaten. Handwerker bauten das Zweirad lediglich anhand des Nachrichtentextes nach. Dabei ging das Filigrane verloren, weshalb Kritiker diese Versionen »plump« schimpften. Aus jahrelang getrocknetem Waldeschenholz gebaut, war das Original ein Leichtgewicht von 22 Kilogramm gewesen und somit nicht schwerer als ein Hollandrad heute. Überhaupt verleitete die Tatsache, dass die originale Laufmaschine aus Holz, dem Maschinenbaustoff jener Zeit, konstruiert war, später zu der Fehleinschätzung, es handle sich um ein nur für Volkskundler interessantes Gerät. Tatsächlich war die Laufmaschine nicht bloß ein Vorläufer, sondern konzeptionell bereits das Urfahrrad. Das erweisen auch diverse Details: gleich große Räder von 27 Zoll Durchmesser (wie heute wieder); Lenkstabilisierung durch Nachlauf des Vorderrads (siehe dazu den Beitrag ab S. 68); Achsen in Gleitlagern mit Messingbüchsen, Naben mit verschleißbarer Bohrung zum Ölen; anklappbare Stützen zum Parken; Gepäckträger hinter dem Sattel; zwei Packtaschen beidseits des Vorderrads; vom Lenker aus zu betätigende Schleifbremse aufs Hinterrad; höhenverstellbarer Sattel und Lenker. Übrigens ließ sich der Lenker nach vorn umklappen, um das Fahrzeug an Steigungen auch hinter sich herzuführen. Dass die Laufmaschine noch keinen Pedalantrieb hatte, sondern durch Abstoßen der Füße vorwärtsbewegt wurde, hatte seinen Grund: Bis auf die jungen Schlittschuhläufer traute sich damals niemand, die Füße vom sicheren Boden zu nehmen.

Im November 1817 kam bei der Buchhandlung Schwan & Götz, die schon Schillers »Die Räuber« gedruckt hatte, endlich Drais' eigene, vierseitige Beschreibung mit zwei Kupferstichen heraus, nach der ein Wagner in Mannheim die Laufmaschine baute. Sie enthielt auch eine Bedienungsanleitung, in der Drais das Balancieren noch falsch beschrieb: Man solle auf das gepolsterte Balancierbrett einwirken, auf dem die Unterarme ruhen: »immer da hinunterdrücken, wo das Brettchen anfangen will, in die Höhe zu steigen«. Dies dürfte nichts bewirkt haben, denn Balancierbrett und Sattel waren starr miteinander verbunden, und der Fahrer saß darauf ohne Bodenkontakt. 1820 beschrieb Drais die Physik dann korrekt: »Wann man nachher in dem Schuß ist und aus Versehen die Balance etwas verloren hat, kann man sich gewöhnlich mit den Füßen helfen oder wenn man ein bißchen gegen die Richtung leitet, auf welche der Schwerpunkt des Ganzen sich neigte.«

Auch die Einleitung einer Kurve, indem man unwillkürlich den Lenker kurz in die Gegenrichtung dreht, hatte Drais schon beobachtet, oder zumindest lässt sich die folgende Äußerung so interpretieren: »Wenn man eine



Stereometrische Umzeichnung des Kupferstichs der Maß-Laufmaschine von 1817. Drais beschrieb

optionale Extras wie Taschen vorn und einen Gepäckträger hinten. Die Schleifbremse wurde mit einer Schnur ans Rad gedrückt, die in einem Fingerring endete.

J. LESSING, MIT FRIEDL. GEN. VON HANS-ERHARD LESSING

Joseph Roux'
»Course de Vélocipèdes« von 1869 zeigt den Start eines Rennens. Die mit einer Tretkurbel am Vorderrad ausgestatteten französischen Räder waren Lifestyle-Produkte, deren Benutzer sich in Klubs zusammenschlossen.



MIT FRIH. GEN. VON VELODROMA NUNEGEN

Schwenkung machen will, richte man unmittelbar vorher den Schwerpunkt etwas auf die innere Seite und lenke gleich darauf hin.« Die Körperneigung zur inneren Seite drücke über die Arme den Lenker wohl kurz nach außen.

Der Goethe der Erfinder

Man kann sagen, dass Drais damals ein berühmter Mann war. Das ist etwa daran abzulesen, dass der Hirnforscher Gall eine Lebendmaske des Erfinders in seine Sammlung aufnahm, also eine Abformung des Gesichts. Der einzige andere Deutsche darin war der Dichterstern Johann Wolfgang von Goethe. Gleich zwei wissenschaftliche Gesellschaften nahmen Drais als Mitglied auf. Der junge Markgraf Leopold, der kommende Großherzog, schrieb ihm, »daß abermals durch Dero ausgezeichnetes Talent für Wissenschaft und Industrie die Welt mit einer nützlichen und genialischen Erfindung beschenkt worden ist, die Ihrem Geist sowohl, als dem Bestreben, gemeinnützig zu sein, viele Ehre macht.«

Unternehmer werden konnte Drais wegen des erwähnten Nebentätigkeitsverbots nicht, und es wäre angesichts der vielen Imitationen auch sinnlos gewesen. In Paris fand der Erfinder aber 1818 einen Lizenznehmer in dem Schlittschuh-Promoter Jean Garcin. Dieser vermietete mit viel Erfolg vor allem dreirädrige Versionen in Vergnügungsparks wie dem Tivoli an junge Pärchen.

In London brachte der Kutschenbauer Denis Johnson angeblich verbesserte Versionen heraus. Leider ließ er den stabilisierenden Nachlauf und die Bremse weg, was Unfälle auf den Bürgersteigen der Stadt und bald ein Fahrverbot mit Geldstrafe zur Folge hatte. Dergleichen wiederholte sich bedauerlicherweise in Mailand, Philadelphia, New York und Kalkutta. Am Ende wurden die bis dahin weltweit schätzungsweise 5000 bis 10000 Laufmaschinen von den Behörden verboten. Es sollte Jahrzehnte dauern, bis Drais' Erfindung wieder aufgegriffen und weiterentwickelt wurde. Nach einem Rollschuhboom Anfang der 1860er Jahre

mutig geworden, statteten Erfinder in Paris die Vorderäder mit Trekkurbeln aus; auf den mittlerweile gepflasterten Straßen der Metropole kam dieses »vélocipède« deutlich besser voran als sein Vorgänger. Bald wurden solche Fahrzeuge auch in anderen Ländern, insbesondere in den USA, hergestellt.

Dennoch sollte es fast 200 Jahre dauern, bis Karl Drais als Entwickler und Vordenker anerkannt wurde. Es bedurfte einer erneuten Quellenauswertung durch den Autor, diesen Missstand zu verstehen. Letztlich ist er wohl politisch begründet! Drais hatte sich nämlich während der Badischen Revolution 1849 per Zeitungsanzeige vom Adel losgesagt und wollte nur noch Bürger Karl Drais genannt werden. Schon im Vormärz hatte er sich als Demokrat offenbart und war nur knapp einem Attentat entgangen.

Das Ziel der Aufständischen war eine badische Republik unter der Souveränität des Volkes, aber wie überall in den deutschen Kleinstaaten wurde die Revolution niedergeschlagen. Im Juli 1849 eroberten Truppen unter preußischer Führung Rastatt als letzte Festung. Drais' Pension wurde restlos beschlagnahmt; ein Versuch, ihn per ärztlichem Gutachten zu entmündigen, konnte abgewendet werden. Zwei Jahre später starb Drais mittellos in Karlsruhe. Noch während der Umbettung seiner Gebeine in den neuen Hauptfriedhof der Stadt verbreiteten Monarchisten 1891 verächtliche Anekdoten und Flugblätter. Diese Kampagnen endeten erst 1918 mit dem Untergang des Deutschen Kaiserreichs, doch zu diesem Zeitpunkt hatten sie ihr Ziel erreicht: Der geniale Erfinder Karl Drais galt als kuriose Randerscheinung der Technikgeschichte. ◀

QUELLEN

Hadland, T., Lessing, H.-E.: Bicycle Design: An Illustrated History. The MIT Press, Cambridge 2014

Technoseum (Hg.): 2 Räder – 200 Jahre. Freiherr von Drais und die Geschichte des Fahrrads. Theiss, Stuttgart 2016

SOZIALGESCHICHTE VOM ADELSSPIELZEUG ZUM

Was als Spielzeug reicher junger Männer begann, wurde erst nach dem Ersten Weltkrieg zum Massenverkehrsmittel. Zwischendurch vom Auto an den Rand gedrängt, spielt das Fahrrad heute seine alten Vorzüge aufs Neue aus.



Thomas Kosche promovierte 1986 in Bonn in Geografie. Er ist Leiter der Abteilung Sammlungen des Technoseum Mannheim und Kurator der Großen Landesausstellung Baden-Württemberg »2 Räder – 200 Jahre. Freiherr von Drais und die Geschichte des Fahrrades«.

► spektrum.de/artikel/1438963

► Als der Freiherr Karl von Drais am 12. Juni 1817 in Mannheim zur ersten Ausfahrt mit der von ihm konstruierten Laufmaschine aufbrach, war ihm eine epochale Erfindung gelungen (siehe »Karl Drais – das vergessene Genie«, S. 62). Aber obgleich Drais nicht nur bei der Konstruktion seines Urfahrrads, sondern auch bei dessen Vermarktung beträchtliche Fantasie aufbrachte, blieb der kommerzielle Erfolg aus. Ein vom badischen Großherzog, seinem Taufpaten, für zehn Jahre gewährtes »Erfindungs-Patent« galt außerhalb Badens nichts. Vielerorts griffen Nachahmer die Idee begeistert auf, ohne auf den Urheber Rücksicht zu nehmen.

Für wie viele Geräte Drais den Kaufpreis oder zumindest eine Lizenzgebühr kassiert hat, ist nicht verlässlich zu ermitteln. Die wenigen erhaltenen Exemplare mit einer Lizenzplakette stammen aus dem Besitz des europäischen Hochadels – wenig erstaunlich bei den Preisen. Eine beim Erfinder bestellte Laufmaschine mit höhenverstellbarem Sitz und ebensolcher Lenkvorrichtung sollte 50 Gulden kosten, so viel, wie mancher Schullehrer in einem ganzen Jahr verdiente.

Davon abgesehen hatten die meisten Zeitgenossen 1817 andere Sorgen. Hinter ihnen lagen die seit 1792 andauernden Koalitionskriege zwischen Frankreich und seinen Rivalen, die Auflösung des Heiligen Römischen Reichs und die von Napoleon angestoßene politische und territoriale Neugliederung Europas. Das »Jahr ohne Sommer« 1816 mit seinen massiven Ernteaussfällen hatte in Süddeutschland eine Hungersnot zur Folge.



Von den Mitgliedern des »Radfahrer-Vereins Ehingen«, die 1893 stolz für den Fotografen posieren, halten noch zwei dem Hochrad die Treue.

MIT FRIEDRICH VON DRAIS: FOTO: DEUTSCHES FARRADMUSEUM, BAD BRÜCKENAU

DES FAHRRADS MASSENVERKEHRSMITTEL



MIT FRIEDL. GEA. VOM DEUTSCHEN FAHRRADMUSEUM, BAD BRÜCKENAU

AUF EINEN BLICK VEHIKEL DES SOZIALEN FORTSCHRITTS

- 1** Das Fahrrad begann als Spielgerät der Eliten, wurde Ende des 19. Jahrhunderts zum Sport- und Freizeitfahrzeug des wohlhabenden Bürgertums und entwickelte sich erst später zum Massenverkehrsmittel.
- 2** Unter dem Siegeszug des Automobils versank es in die Bedeutungslosigkeit – kehrte aber wenige Jahrzehnte später zurück.
- 3** Heute ist das Fahrrad zugleich Alltagsgegenstand, Objekt des gehobenen Lebensstils, Fitnessgerät und ökologisch unbedenkliche Lösung für städtische Verkehrsprobleme.

Wohin hätten die Leute auch fahren sollen? Die meisten Menschen waren ohnehin durch behördliche Vorschriften an ihren Geburtsort gebunden, die Straßen waren schlecht, und auf den Bürgersteigen wurde das Fahren alsbald verboten, in Mannheim schon 1817. Ein Jahr später war es dort nur noch auf dem Hauptweg des Schlossgartens gestattet.

Damit blieb die Nutzung des Geräts den wenigen Menschen vorbehalten, die genügend Geld und Zeit hatten oder gar über einen eigenen Park mit ebenen Wegen verfügten. Vereinfachte Nachbauten des Zweirads fanden in England zahlreiche Liebhaber. Spottnamen wie »Dandy Horse« oder »Hobby Horse« geben einen Hinweis darauf, dass sich überwiegend junge Herren aus Aristokratie und Oberschicht damit vergnügten.

Mehr als 40 Jahre vergingen, bis die Laufmaschine des Freiherrn von Drais eine technische Weiterentwicklung erfuhr. Es ist nicht geklärt, wer als Erster auf die Idee kam, das Vorderrad mit einer Tretkurbel zu versehen. 1867 stellte Pierre Michaux diese neue Variante, die er in seiner Pariser Fabrik in Serie baute, mit großem Erfolg während der dortigen Weltausstellung vor. Neu war nicht nur die Kurbel, sondern auch die Notwendigkeit, zum Fahren die Füße vom Boden zu nehmen. Das Balancieren und Fahren auf den schweren »Velocipeds« mit geschmiedetem Rahmen und noch aus Holz gefertigten und mit Eisenreifen versehenen Rädern war eine Kunst für sich. Die lernte man nicht als Kind, sondern als Erwachsener. Carl Benz, Ingenieur, begeisterter Velocipedist und später Erfinder des Automobils mit Verbrennungsmotor, schilderte, dass es ihn 14 Tage kostete, das Rad zu beherrschen.

Gleichwohl entstanden zahlreiche Produktionsstätten auch in Deutschland. Die ausschließlich männlichen Kunden für die exklusiven Vehikel kamen nun vor allem aus dem gehobenen Bürgertum. Ende der 1860er Jahre erlebten die Tretkurbelvelocipeds einen regelrechten Boom in Europa und den USA. Eingesetzt wurden sie weiterhin nicht als Alltagsfahrzeug, sondern zum Vergnügen und zum Rennsport. So nahmen 1869 rund 300 Teilnehmer am

ersten Langstreckenrennen von Paris nach Rouen teil, eine Entfernung von immerhin 130 Kilometern.

Eine starr mit der Achse verbundene Tretkurbel erlaubt an einem Vorderrad normaler Größe keine hohen Geschwindigkeiten. In den 1870er Jahren wuchs daher dessen Durchmesser stetig an. Um Gewicht zu sparen, ersetzte man die Holzräder durch solche mit Drahtspeichen und Metallfelgen und bestückte sie mit Vollgummirreifen. Die Hochräder waren teuer, elegant und gefährlich. Ein übersehener Stein auf der Fahrbahn oder ein Schlagloch konnte den Fahrer kopfüber auf den Boden schleudern, was nicht selten tödlich endete.

Das tat der Beliebtheit keinen Abbruch, eher im Gegenteil. Junge und weniger junge Männer aus dem wohlhabenden Bürgertum zeigten ihren Status und ihren Wagemut mit dem außergewöhnlichen Spielzeug. Bereits 1869 hatten sich gleichgesinnte Herren zum »Eimsbütteler Velocipeden-Reitclub« zusammengetan, dem späteren »Altonaer Bicycle-Club von 1869/80«, der als ältester Fahrradklub überhaupt gilt. In den 1880er Jahren, der Blütezeit des Hochrads, wurden dann zahlreiche derartige Vereine gegründet. »All Heil« lautete der Gruß, der sich vielfach in den Namen der Zusammenschlüsse wiederfand. Zum Programm gehörten nicht nur Ausfahrten und Rennen, sondern auch Treffen mit dem Charakter gesellschaftlicher Großereignisse inklusive Theater- und Musikaufführungen.

Die Ära der Hochräder währte nicht lange (Bild S. 68/69). Vor allem in England trieb man die Entwicklung eines neuen, weniger unfallträchtigen Fahrradtyps voran, was schließlich zurück zur Urform mit zwei gleich großen Rädern führte. Ende der 1880er Jahre war das Konzept des »Sicherheitsniederrads« marktreif. Der Rahmen bestand aus einem rautenförmigen Rohrviereck, und der Fahrer saß mittig über den Pedalen, mit denen er über eine Kette mit Übersetzung das Hinterrad antrieb. Damit war die bis heute gültige Gestalt des Fahrrads gefunden.

Eine weitere wegweisende Innovation, der luftgefüllte Reifen, machte das Fahren komfortabler und schneller. Hochradfahrer hatten für die Nutzer der niedrigen Variante zunächst nur Hohn übrig und schmähten sie als »Teckel«. Aber dank ihrer technischen Überlegenheit setzten sich die Niederräder rasch durch.

Nur wenig später brachten englische Konstrukteure eine Damenvariante mit niedrigem Durchstieg ohne Oberrohr heraus. Während das Fahren auf einem Tretkurbel- oder gar Hochrad mit bodenlangem Rock, Unterrock und Schnürmieder faktisch unmöglich war, machte das neue Gerät den Weg für die Frauen frei – zumindest in der Theorie. In der Praxis blieben Radfahrerinnen vor 1895 eine zahlenmäßig sehr kleine Gruppe. Zu groß waren die Widerstände von allen Seiten, von Ärzten, Pfarrern, Ehemännern und nicht zuletzt von den Geschlechtsgenossinnen ohne Fahrradambitionen. Diejenigen, die sich darüber hinwegsetzten und zum Fahren kürzere Röcke, Hosenröcke oder gar Pumphosen trugen, konnten allerdings nicht nur ihren Aktionsradius erweitern, sondern auch zumindest zeitweilig der Kontrolle durch Ehemann und Familie enttrinnen.

Es ist in der Genderforschung diskutiert worden, ob das Fahrrad eine bedeutende Rolle für die Emanzipation der



»Eine moderne Köchin.« Karikatur aus den »Fliegenden Blättern« aus München, 1898.

Frauen gespielt hat. Sicher nicht für das Erringen politischer Rechte, des Wahlrechts oder der Gleichberechtigung in der Bildung und auf dem Arbeitsmarkt – aber sehr wohl auf der individuellen Ebene, als Mittel zu einer größeren Selbstbestimmung im täglichen Leben.

Radfahrervereine als Verfechter der Sozialdemokratie

An der Schichtzugehörigkeit der Nutzer änderte das Niederrad jedoch zunächst nichts. Männer wie Frauen auf Fahrrädern waren Angehörige der Oberschicht oder der oberen Mittelschicht. Noch in den 1890er Jahren musste man für ein Fahrrad mehrere Monatslöhne eines Handwerkers oder Industriearbeiters auf den Tisch legen.

Gegen Ende des Jahrzehnts stiegen die Löhne, zugleich sanken die Preise für die mittlerweile zum industriell gefertigten Massenprodukt gewordenen Räder. Amerikanische Fabriken warfen ihre Überproduktion zu Dumpingpreisen auf den europäischen Markt. Kostete ein Fahrrad mittlerer Ausstattung und Qualität um 1890 noch 300 Mark, war der Preis für ein vergleichbares Gefährt zehn Jahre später auf die Hälfte bis ein Drittel gesunken. Zudem gab es inzwischen Gebrauchsräder, die sich besser verdienende Handwerker, Angestellte und Arbeiter leisten konnten.

Mit dem Auslaufen der Sozialistengesetze 1890 durften diese Gruppen Vereine mit politischen Zielen gründen.

Dabei spielte das Fahrrad eine wichtige Rolle. Der 1893 in Leipzig gegründete »Arbeiter-Radfahrerbund« verfolgte das Ziel der Agitation für die Sozialdemokratie und die Interessen der Arbeiter. Infolge behördlicher Repression musste sich der Verband bald wieder auflösen. 1896 kam es dann in Offenbach zu einer schlagkräftigen Neugründung. Der »Arbeiter-Radfahrerbund Solidarität« (ARB) bekannte sich offen und radikal zu den Zielen der Arbeiterbewegung. Im Gründungsjahr hatte der Verein 500 Mitglieder; die Zahl stieg bis 1908 auf 120 000 und bis 1927 auf 250 000.

In dem Maß, in dem das Fahrrad für Durchschnittsverdiener interessant wurde, sank sein Wert als Statussymbol der Reichen. Wie sollte man sich auch mit diesem Gefährt von der Masse abheben, wenn ab 1896 ganz gewöhnliche Postboten es zu dienstlichen Zwecken verwendeten! Diese Kreise wandten sich in der Folge motorisierten Fahrzeugen zu. Gut ablesbar ist der Imageverlust an der Behandlung in den satirischen Zeitschriften rund um die Jahrhundertwende: Während zwischen 1895 und 1900 kaum eine Ausgabe ohne eine Karikatur zum Thema erschien (Bild links), war das Interesse am Fahrrad 1903 komplett erloschen. Dessen Rolle übernahm nun das Automobil.

Der Wert des Fahrrads als Verkehrsmittel stieg dafür beharrlich. Seine Benutzer genossen einen größeren Bewegungsradius, insbesondere konnten sie weitere Wege zur Arbeitsstätte in Kauf nehmen und die beengten Wohnviertel in Fabriknähe verlassen. Die Landbewohner konnten nun mit Leichtigkeit über die Grenzen ihres Dorfs hinausgelangen.

Ungebrochen populär bei allen gesellschaftlichen Schichten blieben die Fahrradrennen auf der Straße und der Bahn, wenngleich die Arbeitervereine Geschwindigkeitswettbewerbe ablehnten und das Reigenfahren und den Saalsport propagierten. Längst hatte auch das Militär das Fahrrad entdeckt und stattete Melder und Kampfeinheiten damit aus – allerdings ohne nennenswerte strategische Wirkungen.

Zum Massenverkehrsmittel für Männer und Frauen aller Einkommensschichten und Altersgruppen avancierte das Fahrrad erst nach 1920. Damit wurde es zu einem Alltagsgegenstand; unspektakulär, aber unentbehrlich für die täglichen Transportaufgaben der großen Mehrheit, die sich ein motorisiertes Fahrzeug nicht leisten konnte.

In der Weltwirtschaftskrise sanken die Produktionszahlen dramatisch. Die Situation verbesserte sich nach 1932 wieder; dem Fahrrad war jedoch vor allem mit dem Leichtkraftrad ein Konkurrent erwachsen, der besser

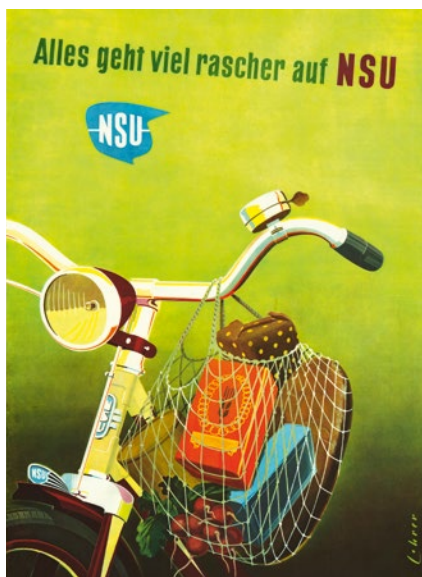
Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ISTOCK / BJDLIX

Am Ende des Fahrradbooms werden Hausfrauen zur Zielgruppe der Werbung. Plakat des Herstellers NSU um 1955.



Verdienende, und das waren wiederum fast ausschließlich Männer, zum Umsteigen bewog.

Die Nationalsozialisten förderten nach der Machtübernahme 1933 zunächst das Fahrrad als ökonomisches und ressourcenschonendes Fahrzeug und forcierten den Radwegebau. Bei der Hitlerjugend dienten Radwanderfahrten mit militärischem Drill den Zielen der Partei. Die Arbeiter-Radfahrvereine wurden verboten, alle anderen gingen in der NS-Organisation des Deutschen Radfahrer-Verbandes auf.

Vom Auto in den Schatten gestellt

In den Jahren des Zweiten Weltkriegs verloren die Fahrräder für die Politik, nicht aber für die Bevölkerung an Bedeutung. Schon bald nach Kriegsbeginn waren sie nur noch auf Bezugschein zu erhalten. Hergestellt wurde fast ausschließlich ein schwarzes »Einheitsrad« in einfacher Ausführung, und selbst damit war es vorbei, als 1943 die Fabriken auf die Produktion von Rüstungsgütern umgestellt wurden. Kautschuk unterlag der staatlichen Zwangsbewirtschaftung, und Reifen wie überhaupt Ersatzteile waren kaum zu bekommen, was es schwierig machte, die vorhandenen Räder funktionstüchtig zu halten.

An der Knappheit änderte sich nach Kriegsende zunächst nichts. Im Oktober 1946 lag der Schwarzmarktpreis für ein Gebrauchtrad bei 2000 Reichsmark. Die Fabriken vor allem in der britischen Besatzungszone fertigten wieder, allerdings zunächst für den Export. 1948 wurden mit 900000 Stück die Zahlen der letzten Vorkriegsproduktion erreicht, auch die Bewirtschaftung endete. Der Bedarf an Fahrrädern war enorm und bescherte der Industrie Rekordzahlen; auf dem Höhepunkt 1950 wurden 1,4 Millionen Räder gefertigt. Bald machten jedoch Motorräder dem Fahrrad die Position des begehrtesten Konsumartikels streitig. 1953 waren rund 2 Millionen Krafträder zugelassen.

Wirtschaftsaufschwung und steigende Einkommen bereiteten dem Boom der Zweiräder ein Ende. Wer es sich leisten konnte, stieg auf einen PKW um. Räder fuhren bald nur noch Kinder, Jugendliche und Hausfrauen, deren Ehemann, wie üblich, das Familienauto in Beschlag genommen

hatte. Wer sonst noch auf einem Zweirad unterwegs war, hatte zu wenig Geld oder den Zug der Zeit verpasst.

Das Stigma des Verlierergefährts haftete dem Fahrrad lange Jahre an. Erst mit weiter wachsendem Familieneinkommen und vermehrter Freizeit gewann es allmählich wieder an Wertschätzung. Ende der 1960er Jahre erlangte das als Autozubehör gedachte Klappfahrrad eine überraschende Popularität – was weniger auf dessen Qualitäten als vielmehr auf eine geschickte Werbestrategie zurückzuführen war. Immerhin wurden bis Ende 1969 in Deutschland eine Million davon verkauft.

Einen kurzen, aber heftigen Boom verzeichneten um diese Zeit die aus den USA kommenden »Highrider« mit bananenförmigem Sattel und hochgezogenen Lenkergriffen. Ein »Bonanzarad«, so die in Deutschland verwendete Bezeichnung, stand auf dem Wunschzettel beinahe jedes Jungen und mancher Mädchen unterhalb des Mofaalters von 15 Jahren.

Unabhängig vom Erfolg solcher Sonderformen wandelte sich in den 1970er Jahren die Einstellung zum Fahrrad. Wachsendes ökologisches Bewusstsein in Teilen der Bevölkerung, durch die Ölpreiskrise von 1973 gefördert, ließ es vor allem in den Großstädten zu einer ernst zu nehmenden Mobilitätsalternative und zu einem Ausdrucksmittel der Weltanschauung werden. Zusätzliche Popularität bescherte die Fitnesswelle. Das kam den Rennrädern zu Gute, die nun auch außerhalb des Vereinssports gefahren wurden. Ebenso verdankt das Mountainbike einen Teil seines Erfolgs dieser Entwicklung. Seit Beginn der 1980er Jahre ist es in Deutschland auf dem Markt und bis heute prominent im Straßenbild vertreten.

Wie in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ist das Fahrrad wieder zum modischen Accessoire geworden, zum Ausdrucksmittel der eigenen Identität und des eigenen Lebensstils. Retro-Räder, minimalistische »Fixies« ohne Freilauf oder »Singlespeeds«, die auf eine Gangschaltung verzichten, sind Vertreter dieses Trends. Manche Individualisten lassen sich Unikate in alternativen Werkstätten aus alten Rennrahmen bauen und mit Hightech-Komponenten ergänzen. In den Großstädten setzen Planer und Politiker auf das Rad, um dem zunehmenden Gedränge der fahrenden und der parkenden Autos sowie der Luftverschmutzung abzuwehren.

Damit treten die Vorzüge des Fahrrads, die für einige Zeit aus dem Blick geraten waren, wieder in den Vordergrund. Es ist energieeffizient, emissionsfrei, Platz sparend und gesundheitsfördernd. Diese Eigenschaften werden für die absehbare Zukunft eine wesentliche Rolle spielen, und das nicht nur in den Industrienationen, sondern überall auf der Welt. ◀

QUELLEN

Bollschweiler, M. et al. (Hg.): Rückenwind. Ein Streifzug durch die Fahrradgeschichte. Schriften des historischen Museums Bielefeld, 27, 2011

Hadland, T., Lessing, H.-E.: Bicycle Design. An Illustrated History. MIT Press, Cambridge (Massachusetts) 2014

Lessing, H.-E.: Automobilität. Karl Drais und die unglaublichen Anfänge. Maxime, Leipzig 2003

Unsere Neuerscheinungen!



Antarktis: Leben unter dem ewigen Eis • Beuteschlag: Die schnellsten Bewegungen von Lebewesen • Wassermangel: Kalifornien verdurstet • Exoten: Aliens auf der Erde? • Grenzfragen: Was ist Leben? • € 8,90



Gesellschaft: Das Digitalmanifest • Datenschutz: Die Folgen der digitalen Transparenz • Datensparsamkeit: Zukunftsfähig statt überholt • Big und Smart Data: Wie sollen wir Daten verwenden? Ethik: Autonome Killerroboter? • € 8,90



Klimawandel: Umbrüche am Ende der Eiszeit • Anthropologie: Die Urahren der großen Mythen • Ägyptologie: Ein Puzzle der besonderen Art • Südamerika: Archäologie in Amazonien • Hawaii: Gottkönige im Inselparadies • € 8,90



Quantengravitation: Das fraktale Quantenuniversum • Essay: Ist die Stringtheorie noch eine Wissenschaft? • Schwarze Löcher: Nackte Singularitäten • Kosmische Expansion: Die Dunkle Energie und ihre Feinde • € 8,90; ab 3.3. 2017



Trauma im Kreißaal • Apps: Der Psychiater in der Hosentasche • Eltern: Opfer zweiten Grades • Der mysteriöse Fall Agatha Christie • Schematherapie: Der innere Wandel • Schizophrenie: Den Zweifel wecken • € 8,90

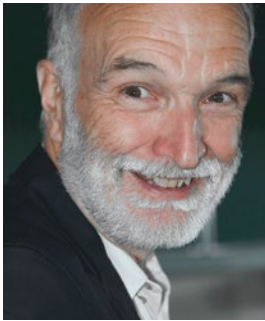


Mindfulness: Der Wert des Augenblicks • Mitgefühl: Stress hemmt Sinne für andere • Meditation: Drei Wege ins Nirwana • Literatur: Einfühlsame Bücherwürmer • Empathie: Wenn das Bauchgefühl trägt • € 5,90

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

**Ausgewählte
 Sonderhefte
 auch im
 PDF-Format**

SCHLICHTING! KONKURRENZLOS SPARSAM



Kein Tier setzt Energie so effizient zur Fortbewegung ein wie ein Mensch. Sofern er Fahrrad fährt!

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/1438962

Das erste Zweirad von 1817 war zwar noch ein Laufrad ohne Pedalantrieb. Doch bereits damit war sein Erfinder Karl von Drais schneller als die Postkutsche – und erst recht, als es zu Fuß möglich gewesen wäre. Mit heutigen Alltagsfahrrädern ist ein durchschnittlicher Erwachsener leicht viermal so flott unterwegs wie beim zügigen Gehen. Radelnd nutzt der Mensch seine Muskelenergie also wesentlich effektiver.

Rein physikalisch lässt sich diese Fortbewegungsart untersuchen und mit anderen vergleichen, indem man die Leistung eines Radlers betrachtet. Sie ergibt sich aus dem Produkt der Fahrgeschwindigkeit und der Summe der diversen Widerstandskräfte, die er überwinden muss. Sie entstehen vor allem zwischen den Reifen und dem Untergrund sowie bei Wechselwirkungen mit der umgebenden Luft. Durch den Boden erfährt der Radler den so genannten Rollreibungswiderstand. Dieser ist proportional zur gesamten Gewichtskraft von ihm und seinem Gefährt und weitgehend unabhängig von der Geschwindigkeit. Man drückt die Proportionalität daher durch eine Konstante aus, die von der jeweiligen Reibung zwischen Reifen und Straßenbelag abhängt: den Reibungskoeffizienten μ . Die Oberfläche der Fahrbahn muss man hinnehmen, kann indes durch die Wahl passender Reifen μ durchaus verbessern.

Da die Rollreibung außerdem proportional zur Gewichtskraft ist, vermindert eine geringere Masse des Radlers seine Mühen. Dann hätte er es zudem bei Stei-

gungen entsprechend einfacher. Leichtbaumaterialien helfen zwar ein wenig, aber da hauptsächlich der Fahrer selbst zur Gesamtmasse beiträgt, ist die wesentlich günstigere Strategie, öfter aufs Rad zu steigen – und dadurch abzunehmen. Lediglich im Rennsport, wo es um Zehntelsekunden geht, lohnt es sich, technisch jedes überflüssige Gramm kostspielig einzusparen.

In die konstante Größe der Rollreibungskraft bezieht man meist stillschweigend die Reibungsverluste mit ein, die beim Übertragen der Muskelenergie auf das An-

triebsrad auftreten, denn auch dieser Anteil hängt kaum von der Geschwindigkeit ab. Die Verluste in den Tretkurbeln, der Kette und den Lagern der modernen Fahrräder sind ohnehin

Radfahren kommt dem Flug der Vögel am nächsten

Louis J. Halle (1910–1998)

verhältnismäßig klein; der Wirkungsgrad liegt hier bei 90 bis 95 Prozent. Das ist vor allem den Kugellagern zu verdanken, die verlust- und verschleißreiches Gleiten durch Energie sparendes Rollen ersetzen. Ihre Erfindung in der Mitte des 19. Jahrhunderts hat der Entwicklung des Fahrrads einen deutlichen Schub gegeben.

Wäre die Rollreibung der einzige zu überwindende Fahrwiderstand, könnte man ein Schwindel erregendes Tempo erreichen. Beispielsweise schaffte der Niederländer Fred Rompelberg 1995 mit einem Spezialrad im Windschatten eines Rennwagens eine Höchstgeschwindigkeit von 268,8 Kilometern in der Stunde. Ein typischer Wert für die Rollreibungskraft bei einem Fahrrad liegt bei fünf Newton. Legt man diesen Wert zu Grunde, so hätte Rompelberg eine Spitzenleistung von rund 370 Watt auf



ISTOCK / OSTILL



ISTOCK / OSTILL

Wer sich in Rennfahrerhaltung auf sein Rad legt (links), bietet der Luft weniger frontale Angriffsfläche und wird zudem besser von ihr umströmt als jemand, der aufrecht im Sattel sitzt (rechts). Die aerodynamischen Vorteile gehen allerdings auf Kosten der Bequemlichkeit.

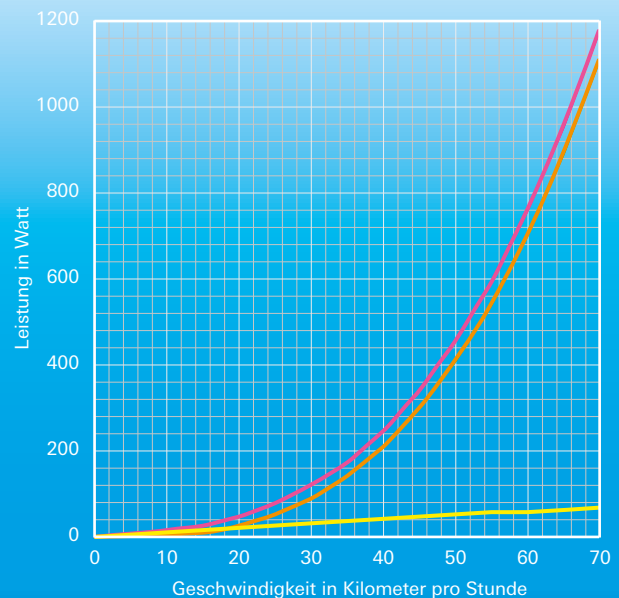
das Rad übertragen. Damit wären unter normalen Bedingungen nur etwa 40 Kilometer in der Stunde möglich (siehe »Erzielte Leistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit«, rechts). Der Unterschied liegt am Einfluss der Luftreibung, die bei höheren Geschwindigkeiten klar dominiert. Die Luftwiderstandskraft ist nämlich proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit; sie steigt unter sonst gleichen Bedingungen bei doppelter Geschwindigkeit auf den vierfachen Wert.

Eine optimierte Haltung spart viel Energie – oder bringt ein klein wenig mehr Tempo

Das Rad samt Fahrer schiebt die Luft gleichsam weg. Die Luftwiderstandskraft ist darum außerdem proportional zur frontalen Fläche des Gespanns und zur Dichte der Luft. Eine zusätzliche Proportionalitätskonstante trägt der Tatsache Rechnung, dass sich je nach Windschlüpfrigkeit nur ein Teil der Fläche auswirkt. Wenn man von der aufrechten Tourenfahrer- zur gekrümmten Rennfahrerhaltung wechselt, verringert man gleichzeitig sowohl die reale projizierte Fläche in Bewegungsrichtung als auch diesen so genannten Widerstandsbeiwert oder kurz c_w -Wert.

In Experimenten an unserem Institut haben wir untersucht, wie sich die beiden Sitzpositionen auswirken.

Erzielte Leistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit



Die gelbe Kurve stellt den Anteil der Rollreibung, die orangefarbene den Anteil des Luftwiderstands und die rote die Gesamtleistung eines Radlers in Rennfahrerhaltung dar.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: HANS-JOACHIM SCHLICHTING

Auf Fotos zählten wir die Querschnittsflächen maßstabsgerecht aus und stellten bei der Rennfahrerhaltung eine Reduktion um etwa 16 Prozent fest. Wir ermittelten zudem die jeweiligen Leistungskurven und berechneten daraus einen um rund 24 Prozent kleineren c_w -Wert. Insgesamt bietet man der Luft also 36 Prozent weniger Widerstand. Bei unseren Tests verminderte die Rennfahrerhaltung bereits bei einer Geschwindigkeit von 20 Kilometern in der Stunde die dafür nötige Leistung von 61 auf 45 Watt, das heißt um gut ein Viertel. Wollte man die Ersparnis nutzen, um schneller zu fahren, wären wegen der überproportionalen Auswirkungen des Luftwiderstands allerdings nur drei Kilometer in der Stunde mehr möglich. Einen Alltagsradler wird diese Erkenntnis wohl kaum von der deutlich bequemeren Tourenfahrerhaltung abbringen.

Die Luftwiderstandskraft ist außerdem proportional zur Luftdichte, die ihrerseits von der Temperatur und der Höhe abhängt. Auf Meereshöhe ist sie bei 30 Grad Celsius etwa zehn Prozent geringer als bei null Grad. Den rein aerodynamischen Vorteil macht jedoch das reduzierte Leistungsvermögen des Körpers bei Hitze teilweise zunichte. Dünnere Luft – ob durch Wärme oder große Höhen – enthält zudem weniger Sauerstoff, was sich ebenfalls negativ auf unseren Organismus auswirkt.

Unschlagbare Einheit von Muskeln und Maschine

Mit diesen Zusammenhängen lassen sich die wesentlichen Größen für eine Fahrt auf ebener Strecke und bei Windstille berechnen. Mit unserem Versuchsrad waren in aufrechter Tourenfahrerhaltung bei einer Geschwindigkeit von 13,5 Kilometern pro Stunde Rollreibung und Luftwiderstand gerade gleich groß. Ein derart niedriges Tempo ist typisch für den Alltagsgebrauch, darum spielt hier die Leichtläufigkeit eine wichtige Rolle. Ein größerer Aufwand zur Verbesserung der Aerodynamik lohnt sich hingegen kaum, zumal man bei gewöhnlichen Fahrten wenig geneigt sein dürfte, eine unkomfortable Haltung auf sich zu nehmen. Ganz anders ist die Situation im Rennsport. Hier

Nur in Verbindung mit dem Fahrrad setzt der Mensch Stoffwechselenergie mit einem Wirkungsgrad von 25 Prozent ein

werden alle Details optimiert, um sowohl beim Streckenfahren als auch beim Sprint Höchstgeschwindigkeiten möglich zu machen. Fragen der Bequemlichkeit sind dem untergeordnet.

Ob man nun den fast auf seinem Rad liegenden Rennfahrer vor Augen hat, der sich mit hoher Geschwindigkeit elegant in die Kurve neigt, oder jemanden, der seinen Drahtesel gemütlich aufrecht durch die Stadt bewegt – in beiden Fällen gewinnt man den Eindruck einer harmonischen, quasi zentaurischen Einheit. Diese Einschätzung hat

Zeitdauer	Leistungsinput (Watt)	Leistungsoutput (Watt)
ununterbrochen	400	75
270 min	669	142
60 min	932	208
1 min	1712	303
5 s	4580	1120

Der Körper eines Menschen kann unterschiedlich viel metabolische Leistung freisetzen, je nachdem, wie lange er sich anstrengen muss (Leistungsinput; Literaturwerte aus einer Studie von 1960, siehe Quellen). Zieht man einen Grundumsatz von 100 Watt ab und berücksichtigt den Wirkungsgrad des Fahrrads von 25 Prozent, lässt sich ausrechnen, wie viel davon in den verschiedenen Zeiträumen auf das Rad übertragen wird (Leistungsoutput).

einen realen energetischen Hintergrund. Nur in Verbindung mit dem Fahrrad kann der Mensch die von seinem Stoffwechsel zur Verfügung gestellte Energie mit einem Wirkungsgrad von etwa 25 Prozent in mechanische Energie umwandeln und für den Vortrieb einsetzen. Bei anderen körperlichen Aktivitäten ist die Ausbeute meist erheblich niedriger. Wenn wir beispielsweise laufen, geht ein großer Teil der mechanischen Energie nicht direkt in die Vorwärtsbewegung, sondern wird unter anderem dazu verwendet, bei jedem Schritt den Körperschwerpunkt zu heben.

Vergleicht man den Wirkungsgrad beim Radfahren mit dem so genannten Carnotschen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine, so liegt er in derselben Größenordnung wie etwa bei einem PKW mit Ottomotor. Doch der Vergleich hinkt, denn eine Wärmekraftmaschine treiben Temperaturunterschiede an. Das ist beim Mensch ausgeschlossen – rechnerisch wären bei einer Umgebungstemperatur von 20 Grad Celsius selbst unter Idealbedingungen mindestens 100 Grad Körpertemperatur nötig. Wir wandeln stattdessen die chemische Energie aus den Nahrungsmitteln direkt um. Aber eines hat unser Organismus mit einem Motor gemein: Drei Viertel der umgesetzten Energie fallen als Wärme an. Sie muss genügend schnell an die Umgebung abgegeben werden, sonst droht Überhitzung.

Darum kann man in einem geschlossenen Raum auf einem Fahrradergometer nicht lange Höchstleistungen erbringen – die Luftkühlung des Fahrtwinds fehlt. Wer sich als Radfahrer über den Gegenwind ärgert, kann sich damit trösten, dass dieser letztlich genauso wichtig ist wie der Energienachschub durch eine angemessene Ernährung.

Der Wirkungsgrad von 25 Prozent gilt unter optimalen Bedingungen. Vor allem muss eine natürliche Bewegung der Beine die Energie auf das Rad übertragen, die sich an den besten Trittfrequenzen für die Schenkel orientiert. Kann der Fahrer nur langsam treten (bei Gegenwind oder bergauf) oder muss er es sehr hochfrequent tun (bei Rückenwind oder bergab), wird der Ablauf unverhältniss-

mäßig unangenehm und anstrengend. Abhilfe schafft eine Gangschaltung. Je unterschiedlicher die auftretenden Bedingungen sind, desto größer muss die Bandbreite an möglichen Übersetzungen ausgelegt sein. Eine bequeme und individuell angepasste Sitzhaltung, bei der sich der Fahrer auf die Bewegungsabläufe konzentrieren kann, steigert den Wirkungsgrad – erhöht möglicherweise aber den Luftwiderstand. Für Radrennfahrer liegt hier ein echtes Optimierungsproblem vor.

Entscheidend für die erreichbaren Spitzen- oder Durchschnittsgeschwindigkeiten ist einerseits die eingangs berechnete Leistung, die auf das Fahrrad übertragen wird, der »Leistungsoutput«. Andererseits kann der Fahrer je nach Konstitution und Trainingsstand eine gewisse physiologische Leistung abrufen, die wir hier Leistungsinput nennen. Dazu gehört immer, auch in Ruhe, der so genannte Grundumsatz. Mit ihm erhält der Körper Temperatur, Gehirnleistung, Atmung, Herzschlag und ähnliche Funktionen aufrecht. Der Grundumsatz beträgt etwa 100 Watt. Alle darüber hinaus abgerufene Energie kann der Körper in die Bewegung stecken. Bei diesem Anteil lässt sich aus dem Leistungsinput, den ein Mensch über verschiedene Zeiträume maximal abzugeben vermag, mit Hilfe des Wirkungsgrads von 25 Prozent überschlagen, welche Geschwindigkeit auf dem Rad zu erreichen wäre (siehe Tabelle links).

Damit und anhand des Leistungsdiagramms stellen wir fest, dass ein trainierter Sportler fünf Sekunden lang eine Spitzengeschwindigkeit von fast 70 Kilometern in der Stunde erreichen würde. Da Weltrekorde mit besseren Fahrrädern als dem aus unserem Beispiel erzielt werden, liegen die realen Werte erwartungsgemäß noch höher. Der Franzose François Pervis fuhr beim Sprint zehn Sekunden lang eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 77 Kilometern pro Stunde. Ebenso liegen wir bei der Abschätzung der Distanz, die in einer Stunde zurückzulegen wäre, mit rund 40 Kilometern unter dem Wert des Stundenweltrekords des Briten Bradley Wiggins von 54,5 Kilometern.

Die Abweichungen sind sicher der Qualität technisch hoch entwickelter Rennräder und dem Leistungsvermögen moderner Profisportler zu verdanken. Doch offenbar gelingen uns bereits mit einigen wenigen Daten recht treffende Abschätzungen, nicht zuletzt wegen der überproportionalen Auswirkungen des Luftwiderstands. Während er den Gelegenheitsfahrer kaum stört, zeigt er selbst dem stärksten Sportler schnell Grenzen auf. Zumindest aus energetischer Sicht ist das Fahrrad damit wohl ein konkurrenzlos demokratisches Fortbewegungsmittel.

QUELLEN

Tucker, V.A.: The Energetic Cost of Moving about. In: American Scientist 63, S. 413–419, 1975

Wilkie, D.R.: Man as an Aero Engine. In: Journal of the Royal Aeronautical Society 64, S. 477–481, 1960

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

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

Freie Mitarbeit: Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer, Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg

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

Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Beck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Katja Mellenthien, Dr. Sebastian Vogel, Prof. Klaus Volkert.

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

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

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 38 vom 1.1. 2017.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2017 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

0,999999... = 1?

In manchen Fällen gibt es zwei verschiedene Dezimaldarstellungen für ein und dieselbe reelle Zahl. Diese wenig geläufige Tatsache kann zu erheblicher Verwirrung führen.



Jean-Paul Delahaye war Professor am Institut für Grundlagen der Informatik der Université de Lille.

► spektrum.de/artikel/1432755

Der mathematische Fortschritt hängt häufig an einer geeigneten Notation. Die Differenzial- und Integralrechnung nahm einen großen Aufschwung mit dem von Leibniz erfundenen Formalismus für das Rechnen mit Größen wie dx und dem Integralzeichen. Das Arbeiten mit Gleichungen kam erst richtig in Gang, als diese nicht mehr in Worten, sondern mit den heute üblichen Rechenzeichen geschrieben wurden. Und die weitaus meisten Europäer lernten das Rechnen mit ganz gewöhnlichen Zahlen erst, als sie die Zahlzeichen der Römer durch das indisch-arabische Stellenwertsystem ersetzten. Wer je versucht hat, zwei größere römische Zahlen schriftlich zu multiplizieren, weiß zu schätzen, wie sehr unsere gewöhnliche Schreibweise das Denken vereinfacht. Zweifellos hätten sich ohne sie weder die Wissenschaft noch der Handel oder die moderne Industrie entwickeln können.

Manchmal allerdings kann eine eigentlich segensreiche Notation hartnäckige Verwirrung stiften. Das gilt, zumindest auf den ersten Blick, für das Problem, um das es hier gehen soll: »Stimmt es, dass $0,999... = 1$ ist?«

Der Ausdruck $0,999...$ bezieht sich offensichtlich auf die Dezimaldarstellung reeller Zahlen. Die Pünktchen am Ende deuten hier an, dass die Folge der Ziffern 9 sich ohne Ende fortsetzt. Das hat nur dann Sinn, wenn man die Idee akzeptiert, dass jede beliebige unendliche Folge von Ziffern mit einem Komma wie beispielsweise $192,252525...$ eine eindeutig definierte Zahl darstellt. Das soll später noch präziser ausgeführt werden.

Wie aber macht ein Mathematiklehrer, ohne einen großen theoretischen Hintergrund voraussetzen zu können, seinen Schülern plausibel, dass $0,999... = 1$ ist? Verschiedene Möglichkeiten stehen zur Auswahl.

Beweis 1: Niemand bezweifelt, dass $1/3 = 0,333...$ ist. Denn wenn man nach dem üblichen Verfahren schriftlich 1 durch 3 teilt, findet man als Teilergebnisse 0, dann 0,3, dann 0,33, dann 0,333. Man überzeugt sich davon, dass das immer so weiter geht. Daraus folgt schließlich, dass $1/3 = 0,3333...$ sein muss.

$$\begin{array}{r} 1 : 3 = 0,333 \dots \\ \underline{0} \\ 10 \\ \underline{9} \\ 10 \\ \underline{9} \\ 10 \\ \underline{9} \\ 10 \\ \underline{9} \\ \dots \end{array}$$

Multipliziert man beide Seiten der Gleichung $1/3 = 0,333...$ mit 3, so erhält man $3 \cdot 1/3 = 3 \cdot 0,333...$, was ausgerechnet $1 = 0,999...$ ergibt.

Man hätte ebenso gut schriftlich 1 durch 9 dividieren und die sich ergebende Gleichung $1/9 = 0,111...$ mit 9 multiplizieren können, mit demselben Endergebnis.

Beweis 2: Definieren wir $u = 0,999\dots$. Multiplizieren wir beide Seiten dieser Gleichung mit 10, was im Dezimalsystem durch eine Kommaverschiebung um eine Stelle nach rechts erledigt wird. Damit erhalten wir $10u = 9,999\dots$. Ziehen wir nun von dieser Gleichung die ursprüngliche Gleichung $u = 0,999\dots$ ab, so erhalten wir $10u - u = 9,999\dots - 0,999\dots$; daraus ergibt sich $9u = 9$ und damit $u = 1$. Also ist $u = 1 = 0,999\dots$, was zu beweisen war.

Beweis 3: Angenommen, $0,999\dots$ sei kleiner als 1. Dann wäre der Mittelwert m der beiden Zahlen größer als $0,999\dots$ und kleiner als 1. Folglich beginnt die Dezimaldarstellung von m mit 0,9. Da m auch größer als 0,99 und kleiner als 1 ist, muss seine Darstellung im Dezimalsystem mit 0,99 beginnen.

Dasselbe Argument gilt für eine beliebige Anzahl an Neunen, woraus folgt, dass die Dezimaldarstellung von m gleich $0,999\dots$ sein muss. Das Mittel wäre somit gleich der kleineren der beiden gegebenen Zahlen. Das ist ein Widerspruch, weil das Mittel zweier verschiedener Zahlen niemals gleich einer der beiden Zahlen ist. Folglich ist die Annahme $0,999\dots < 1$ falsch. Da $0,999\dots > 1$ sowieso nicht zutrifft, bleibt nur $0,999\dots = 1$ übrig.

Man kann diese Überlegung auch anders zu Ende führen. Man setzt $u = 0,999\dots$. Wir haben festgestellt, dass der Mittelwert $m = (u + 1)/2 = u$ ist, also ist $u + 1 = 2u$, woraus $u = 1$ folgt.

Das ist alles gut und richtig – aber es hilft nicht wirklich, wie jeder Mathematiklehrer aus trauriger Erfahrung zu

berichten weiß. Eigentlich glauben es die Schüler einem trotzdem nicht. Das geben sie auch zu, wenn sie sicher sein können, dass ihre Antwort nicht in die mündliche Note eingeht.

Studien aus aller Welt belegen, dass selbst nach mehreren korrekten und sauber vorgeführten Beweisen nicht alle Betroffenen von der Gültigkeit dieser Gleichung überzeugt sind. Dutzende von didaktischen Artikeln beschäftigen sich mit diesem seltsamen Phänomen.

Ich glaube, eine einfache Erklärung dafür anbieten zu können. Seit die Kinder im Alter von sechs bis acht Jahren erstmals den Zahlen mit dem Komma begegnet sind, haben sie – ausdrücklich oder stillschweigend – eine Regel für das Vergleichen dieser Zahlen gelernt, die stets das richtige Ergebnis liefert: Schreibe beide (positiven) Zahlen stellenrichtig untereinander, Komma unter Komma, und gehe sie beide Ziffer für Ziffer von links nach rechts durch, bis du zwei ungleiche Ziffern antriffst. Die Zahl mit der kleineren Ziffer ist auch insgesamt die kleinere.

Wenn zum Beispiel $0,28145$ und $0,2813989$ miteinander zu vergleichen sind, schreibt man

$0,28145$
 $0,2813989$

und erhält, dass die erste Zahl die größere ist, denn 4 ist größer als 3.

Vergleicht man nun nach dieser Regel 1 (was man auch als $1,000\dots$ schreiben kann) und $0,999\dots$, so erhält man

$1,000\dots$
 $0,999\dots$

Die Abschaffung der Infinitesimalien

Nachdem Bonaventura Cavalieri (1598–1647) sich mit seinen »Indivisiblen« weit in das Rechnen mit unendlich kleinen Größen vorgewagt – und die notorischen Widersprüche angetroffen – hatte (**Spektrum** Oktober 2015, S. 64), brachte Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) das Gebiet der Mathematik, das heute noch Infinitesimalrechnung heißt, zu voller Blüte (**Spektrum** Juli 2016, S. 60). Der große Mathematiker Leonhard Euler (1707–1783) ging in seinem grundlegenden Werk »Introductio in analysin infinitorum« (Bd. 1) meisterlich mit den Infinitesimalien um.

Gleichwohl stellte es sich als unmöglich heraus, in wirklich strenger Weise mit ihnen zu rechnen. Das veranlasste den Mathematiker Michel Rolle (1652–1719)

und den Bischof George Berkeley (1685–1753) dazu, ihre Verwendung in Frage zu stellen, weil sie ihnen zu unsicher und letztlich bedenklich erschienen.

Im 19. Jahrhundert gelang es Augustin-Louis Cauchy (1789–1857), Karl Weierstraß (1815–1897) und anderen, die Infinitesimalien zu Gunsten einer neuen Konzeption aufzugeben, die vor allem mit den Begriffen des Grenzwerts und der Stetigkeit arbeitete.

Nach deren Definition konvergiert die Zahlenfolge (x_n) gegen den Grenzwert L , wenn für jedes ε (epsilon), das strikt größer als 0 ist (insbesondere für jedes ε der Form $1/m$, wobei m eine natürliche Zahl ist) eine natürliche Zahl n_0 existiert, so dass für alle natürlichen Zahlen $n > n_0$ gilt: $|x_n - L| < \varepsilon$.

Mit Hilfe dieser Definitionen und der von Georg Cantor (1845–1918) entwickelten Mengenlehre konstruiert man die reellen Zahlen auf der Basis der natürlichen Zahlen. Dieses Konzept (das »mengentheoretische Kontinuum«) ist die heute allgemein akzeptierte Theorie.

Die Idee der Infinitesimalien wurde allerdings niemals ganz aufgegeben. Selbst Cauchy verwendete sie, um den Begriff der Stetigkeit zu formulieren, bevor er ihn mit Hilfe von ε und δ fasste. Der israelische Mathematiker Mikhail Katz beklagt, dass unter der vereinfachenden retrospektiven Mathematik-Geschichtsschreibung in Vergessenheit gerät, dass die Infinitesimalien stets in den Köpfen der Mathematiker gesteckt haben – und segensreich wirksam waren.

und damit das Ergebnis, dass 1,000... größer ist als 0,999..., denn bereits die erste Ziffer der oberen Zahl ist 1 und damit größer als die entsprechende Ziffer der unteren Zahl.

Der Lehrer, mit diesem Argument konfrontiert, müsste ungefähr Folgendes antworten: »Diese Vergleichsregel ist vollkommen richtig für endliche Dezimalbrüche, das heißt für Zahlen mit endlich vielen Stellen hinterm Komma. Aber was für endliche Dezimalbrüche gilt, lässt sich nicht ohne Weiteres auf unendliche übertragen. In diesem Fall wird aus einer richtigen Aussage sogar eine falsche. Das passiert übrigens häufig, wenn man Sachverhalte vom Endlichen auf das Unendliche zu übertragen versucht.«

Nachdem der Schüler nachgedacht hat – und wenn er sich traut, den Mund aufzumachen –, kommt er mit einem Gegenargument: »Sie, Herr Lehrer, haben bei Ihren Beweisen 1 bis 3 einen Übergang von endlichen zu unendlichen Dezimalbrüchen vollzogen; der ist nur deswegen nicht so aufgefallen, weil er hinter diesen unscheinbaren Pünktchen versteckt ist. Wieso ist Ihr Übergang von endlich nach unendlich erlaubt und meiner nicht?«

Epsilon als Rettung

Es hilft also nichts, wir müssen uns die Sache noch einmal richtig ansehen. Was genau hat man sich unter einem unendlichen Dezimalbruch vorzustellen? Wie definiert man die Zahl r , die in der Form $0,a_1a_2a_3\dots a_n\dots$ geschrieben wird, wobei jedes Glied der unendlichen Folge a_1, a_2, a_3, \dots eine Ziffer zwischen 0 und 9 ist? Bei einem endlichen Dezimalbruch bezeichnet per definitionem die erste Ziffer hinter dem Komma die Zehntel, die zweite die Hundertstel, die

Es ist erlaubt, einfach und brutal 0,999... < 1 zu setzen. Ein Widerspruch ergibt sich nicht daraus – aber es bringt auch nichts

dritte die Tausendstel, allgemein die n -te die (10^n) -tel. Entsprechend wäre r die »unendliche Summe«

$$a_1/10 + a_2/100 + a_3/1000 + \dots + a_n/10^n + \dots$$

Und auch das ist definitionsbedürftig, denn offensichtlich kann man unendlich viele Zahlen nicht einfach so addieren. Genau genommen ist r der Grenzwert der Folge der Partialsummen, deren erste Glieder $a_1/10, a_1/10 + a_2/100, a_1/10 + a_2/100 + a_3/1000, \dots$ sind.

Beispielsweise bezeichnet 0,333... den Grenzwert der Folge $0, 3/10, 33/100, 333/1000, \dots$. Die Glieder einer solchen Folge sind sämtlich unproblematisch, denn es handelt sich um endliche Dezimalbrüche.

Und der Grenzwertbegriff selbst? Der ist über jeden Zweifel erhaben, seit Bernard Bolzano, Augustin Cauchy und Karl Weierstraß ihn im 19. Jahrhundert ausgearbeitet und sauber definiert haben. Seine Anwendung gleicht einem Ritual, das streng nach einer vorgeschriebenen Reihenfolge auszuführen ist (siehe »Die Abschaffung der

Infinitesimalien«, S. 79). Zusammen mit einigen weiteren theoretischen Hilfsmitteln, die hier nur mit Namen genannt seien: »Cauchy-Folge«, »dedekindscher Schnitt« oder auch »Intervallschachtelung«, gelang es den Mathematikern, sich auf eine vollkommen präzise Idee der reellen Zahlen und der unendlichen Dezimalbrüche zu einigen.

Dieses Konzept genießt praktisch einhellige Akzeptanz unter den Fachleuten und verschafft ihnen eine sichere Grundlage für die tägliche Arbeit; es wird in der Schule und an der Universität gelehrt und ist allen Beteiligten in Fleisch und Blut übergegangen. Nennen wir es »die klassische Auffassung der reellen Zahlen und des Kontinuums«.

Was sagt uns diese Auffassung zu der Frage: »Ist $0,999\dots = 1$?« Sie gibt – wenig überraschend – dem Lehrer Recht.

Beweis 4: Die Zahl $u = 0,999\dots$ ist der Grenzwert für n gegen unendlich der Folge mit dem allgemeinen Glied $x_n = 0,9 + 0,09 + \dots + 0,00\dots09$ (der letzte Summand hat n Nullen zwischen dem Komma und der Neun). Durch Ausklammern erhält man $x_n = 0,9(1 + 1/10 + \dots + 1/10^n)$.

Wir schreiben 0,9 als $1 - 1/10$ und wenden hierauf die Gleichung $(1 - a)(1 + a + a^2 + a^3 + \dots + a^n) = 1 - a^{n+1}$ an, die man durch Ausmultiplizieren bestätigen kann. Daraus ergibt sich $x_n = 1 - 1/10^{n+1}$. Die Folge 10^{n+1} geht gegen unendlich, also geht $1/10^{n+1}$ gegen 0 und damit x_n gegen 1. Somit ist $1 = 0,999\dots$

Man kann auch die obigen Beweise 1 bis 3 mit dem Konzept des Grenzwerts formulieren und damit ihre Gültigkeit im Rahmen der klassischen Theorie bestätigen.

Bei dieser Beweisführung haben wir von etlichen Rechenregeln für Grenzwerte Gebrauch gemacht, ohne sie im Einzelnen aufzuführen. Jede von ihnen lässt sich ohne große Schwierigkeiten aus der klassischen Auffassung herleiten, und sie sind alle so, wie man sie erwarten würde: Der Grenzwert einer Summe ist die Summe der Grenzwerte; wenn a_n gegen unendlich geht, dann strebt $1/a_n$ gegen 0 (eine andere Ausdrucksweise für »der Grenzwert von $1/a_n$ ist 0«), und so weiter.

Mit einer entscheidenden Ausnahme: Wenn alle Glieder einer Folge y_n kleiner als eine Zahl a sind, gilt das nicht für deren Grenzwert y . Man kann nur schließen, dass $y \leq a$ ist. Das ist es, was der Vergleichsregel des Schülers das Genick bricht.

Der tiefere Grund hinter der Verwirrung des Schülers (und vieler Erwachsener) besteht darin, dass eine reelle Zahl und ein unendlicher Dezimalbruch zwar fast dasselbe sind, aber eben nicht ganz. In der Welt der endlichen Dezimalbrüche einschließlich der natürlichen Zahlen darf man ohne Weiteres eine Zahl mit »ihrer« Dezimaldarstellung identifizieren; es gibt nämlich nur eine. Das gilt für reelle Zahlen im Allgemeinen nicht mehr. Manche von ihnen, nämlich diejenigen der Form $n/10^k$ mit natürlichem Zahlen n und k , haben zwei Dezimalbruchdarstellungen: eine mit unendlich vielen Nullen (die man nicht hinschreibt) und eine mit unendlich vielen Neunen (siehe »Die problematischen Zahlen sind dünn gesät«, rechts). So gelten die Gleichungen: $0,15 = 0,14999\dots$; $12,8 = 12,7999\dots$; $1 = 0,999\dots$

Die problematischen Zahlen sind dünn gesät

Die mangelnde Eindeutigkeit der Dezimalbruchentwicklung betrifft nur einen kleinen Teil der reellen Zahlen.

Alle Zahlen, die zwei Dezimalbruchentwicklungen haben, lassen sich in der Form $n/10^k$ schreiben, wobei n und k natürliche Zahlen sind. Folglich ist die Menge dieser

Zahlen abzählbar unendlich. Da die Menge der reellen Zahlen noch viel unendlicher ist (in der Fachsprache: überabzählbar unendlich), ist die Menge der problematischen reellen Zahlen im Vergleich zur Gesamtheit vernachlässigbar. Die Eindeutigkeit der Dezimalbruchentwicklung gilt folglich »fast überall«,

was in der Mathematikersprache als »überall mit Ausnahme einer Menge vom Maß null« zu lesen ist. Bemerken wir noch, dass man die Dezimalbruchentwicklung mit einem einfachen Mittel eindeutig machen kann: Es genügt, diejenigen Darstellungen zu verbieten, die auf unendlich viele Neunen enden.

Diese Mehrdeutigkeit ist übrigens keine Spezialität des Dezimalsystems. Vielmehr tritt sie in jedem Stellenwertsystem auf, insbesondere in dem Zweier-(Binär-)System, mit dem die Computer rechnen. Dort gilt zum Beispiel $1,000\dots = 0,111\dots$ und $0,101 = 0,100111\dots$

Die reellen Zahlen des aufsässigen Schülers

Na gut, die klassische Auffassung ist allgemein anerkannt, in der Praxis bewährt und widerspruchsfrei. Aber, fragt der aufsässige Schüler, ist sie auch wirklich alternativlos? Kann es vielleicht eine Mathematik geben, in der die Behauptung $0,999\dots < 1$ korrekt ist?

Die Antwort ist ja. Ein Mathematiker hat stets die Freiheit, sich irgendetwas zurechtzudefinieren, solange das nicht zu Widersprüchen führt. Gelingt dies, so existiert dieses Etwas bereits, zumindest in der abstrakten Gedankenwelt. In unserem Fall gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten zu einer solchen Definition. Über deren Brauchbarkeit ist damit noch nichts gesagt. Nach meiner Auffassung können beide Wege in dieser Hinsicht nicht mit der klassischen Auffassung mithalten.

Zur Vereinfachung betrachten wir im Folgenden nur positive Zahlen. Das ist keine ernsthafte Einschränkung; alle Überlegungen lassen sich mit einigen Anpassungen auch auf negative Zahlen anwenden.

Die erste Methode ist einfach und brutal: Man ändert fast nichts und nimmt einfach an, dass $0,999\dots < 1$ sei, ebenso $0,14999\dots < 0,15$ und alle anderen Ungleichungen dieser Art. Damit gewinnt man auch für unendliche Dezimalbrüche die Eindeutigkeit der Zifferndarstellung, die uns oben so viel Kopfzerbrechen bereitete. Jede Folge von Ziffern im Dezimalsystem mit einem Komma (wie $315,212121\dots$) ist eine reelle Zahl, und zwei derartige Zahlen sind genau dann gleich, wenn ihre Ziffernfolgen gleich sind. Ob eine Zahl kleiner ist als eine andere, entscheidet man nach der erwähnten Schülerregel: Schreibe sie stellenrichtig untereinander und gehe sie von links nach rechts durch bis zur ersten ungleichen Ziffer. Diese Ordnungsrelation nennt man »lexikografische Ordnung«. So ist $7345,221222\dots$ kleiner als $7345,222222\dots$

Nennen wir die so definierten Objekte »die reellen Zahlen des aufsässigen Schülers«. Einige ihrer Eigenschaften

sind gewöhnungsbedürftig. So findet man zwischen zwei verschiedenen klassischen Zahlen stets noch unendlich viele andere: Man nehme den Mittelwert der beiden Zahlen, den Mittelwert aus diesem Mittelwert und einer der beiden Zahlen, und so weiter. Für die reellen Zahlen des aufsässigen Schülers trifft das ebenfalls zu – außer wenn die beiden Zahlen klassisch gleich und nur nach der neuen Definition ungleich sind. So gibt es zwischen den (verschiedenen) Zahlen $2,19999\dots$ und $2,200000\dots$ keine andere Zahl, sondern gewissermaßen nur ein Loch. Es gibt sogar unendlich viele solcher Löcher: eines hinter jeder Zahl, die auf unendlich viele Neunen endet. Das passt nicht zu unserer Vorstellung von den reellen Zahlen als einem lückenlosen und überall gleichartigen Kontinuum. Die Zahlengerade des aufsässigen Schülers ist irgendwie unansehnlich, da sie von unendlich vielen Löchern übersät ist.

Weitere Schwierigkeiten ergeben sich, wenn man Regeln für die Addition und die Multiplikation aufstellen will. Im Folgenden sei eine von ihnen mitsamt ihren Mängeln beschrieben; die anderen sind auch nicht besser.

Wie viel ist $0,333\dots + 0,666\dots$? Auf den ersten Blick würde man $0,999\dots$ sagen. Aber diese Wahl ist problematisch; denn $0,333\dots = 1/3$, $0,666\dots = 2/3$, und $1/3 + 2/3 = 1$. Solange nur endliche Dezimalbrüche – oder ganz gewöhnliche Brüche mit Zähler und Nenner – an einer Rechnung beteiligt sind, soll dasselbe herauskommen wie im klassischen Fall. Also definiert man $0,333\dots + 0,666\dots = 1$, oder allgemein: Man addiere zwei Zahlen zunächst nach den üblichen Rechenregeln und »runde dann auf«, wenn es möglich ist. Das heißt, wenn man am linken Rand eines Lochs landet, springe man zum rechten Rand, oder formal ausgedrückt, wenn das vorläufige Ergebnis mit lauter Neunen endet, setze man die letzte Ziffer vor den Neunenfolge eins hoch und ersetze die Neunen durch Nullen. Für die Multiplikation verfährt man entsprechend.

Diese Vorschrift erscheint etwas widersinnig, weil sie genau den Unterschied, auf den der aufsässige Schüler so einen Wert legt, immer dann einebnet, wenn es darauf ankommt, nämlich beim Rechnen. Aber sie ist unter allen denkbaren Vorschriften die beste. Mit ihr gelten insbesondere die Rechenregeln wie Assoziativ-, Kommutativ- und Distributivgesetz.

Auf den ersten Blick verhalten sich die reellen Zahlen des aufsässigen Schülers also ziemlich vernünftig – aber der zweite Blick offenbart seltsame Dinge. So ist 1 nicht mehr das neutrale Element der Multiplikation, denn die Multiplikation mit 1 verändert manchmal eine Zahl. Zum Beispiel gilt $0,999... \cdot 1 = 1$.

Schlimmer noch: Die Kürzungsregel für eine Zahl ungleich null (wenn $a \neq 0$ ist, kann man aus $ab = ac$ auf $b = c$ schließen) gilt nicht mehr: Aus $0,999... \cdot 1 = 1 = 1 \cdot 1$ folgt nicht $0,999... = 1$. Es kann nicht folgen, sonst würde die ganze Konstruktion zusammenbrechen, und man wäre wieder bei den klassischen Zahlen. Also muss man alle gewohnten Regeln für das Rechnen und das Umformen von Gleichungen überprüfen.

Schließlich ist der Grenzwertbegriff in der Welt der reellen Zahlen des aufsässigen Schülers wenig zufriedenstellend: Die Folge $1 - (1/10)^n$ konvergiert nicht gegen 1, sondern gegen $0,999...$. Aber $(1/10)^n$ konvergiert gegen 0. Wollte man die üblichen Regeln für das Rechnen mit Grenzwerten beibehalten, dann würde daraus folgen, dass $(1/10)^n - 1$ gegen -1 konvergiert. Anders gesagt: Wenn eine Folge a_n gegen a konvergiert, dann muss $-a_n$ nicht gegen $-a$ konvergieren. Das ist störend!

Der aufsässige Schüler hat sich also mit Erfolg seine speziellen reellen Zahlen zugelegt, für die tatsächlich $0,999... < 1$ gilt – aber die Theorie knirscht an allen Ecken und Enden. Suchen wir nach einer anderen Möglichkeit.

Der Zugang der Nichtstandardanalysis

Dabei kommen uns unweigerlich die Infinitesimalien in den Sinn: Größen, die kleiner sind als jede positive reelle Zahl, aber größer als null. Die klassische Konzeption hat sie ausgerottet und sich damit jede Menge Widersprüche

vom Hals geschafft. Aber die Mathematiker des 17. und 18. Jahrhunderts, allen voran Gottfried Wilhelm Leibniz (*Spektrum* Juli 2016, S. 60), haben regen Gebrauch von ihnen gemacht, und die Physiker tun das bis heute: Manche Rechnungen lassen sich mit ihnen einfach ungeheuer elegant formulieren. Allerdings ist es im Einzelfall äußerst mühsam zu entscheiden, welche Umformungen erlaubt sind und welche nicht.

Im Jahr 1966 zeigte der amerikanische Mathematiker Abraham Robinson (1918–1974), dass man die drohenden Widersprüche im Zaum halten kann. Seine elegante und mächtige Theorie, die Nichtstandardanalysis, gründet auf der Modelltheorie, einem Teilgebiet der mathematischen Logik, das im 20. Jahrhundert entwickelt wurde. Damit holte Robinson die Infinitesimalien aus der Schmutz-ecke, in welche die klassische Theorie sie verbannt hatte, und lieferte zum Kontinuum von Cauchy und Weierstraß eine ernsthafte Alternative.

Die Nichtstandardanalysis gibt ähnlich der klassischen Theorie einer unendlichen Dezimalbruchentwicklung wie $0,999...$ einen Sinn mit Hilfe konvergenter Reihen. Die Pünktchen stehen also nach wie vor für unendlich viele Neunen. Aber der Begriff »unendlich« kann verschiedene Bedeutungen annehmen, denn es gibt nun viele verschiedene unendlich große natürliche Zahlen H (was in der klassischen Theorie nicht vorkommt). Je nachdem, ob die von den Pünktchen in $0,999...$ dargestellte Unendlichkeit größer oder kleiner ist, erhält man entweder eine reelle Zahl – in diesem Fall die Zahl 1 – oder eine Zahl neuer Art, die strikt kleiner als 1 ist. In der Nichtstandardanalysis ist $0,999...$ (mit H Neunen) gleich $1 - 1/10^H$, und das ist nicht einfach gleich 1, sondern nur bis auf eine infinitesimale Größe.

Welche Theorie der Infinitesimalien?

Ein Zahlensystem, das neben den gewöhnlichen reellen Zahlen auch unendlich kleine enthält, verliert eine wesentliche Eigenschaft der reellen Zahlen, die als archimedisches Axiom bezeichnet wird: Zu zwei positiven Zahlen a und b gibt es stets eine natürliche Zahl n mit der Eigenschaft, dass $n \cdot a > b$ ist. Mit einem (beliebig kleinen) Maßstab der Länge a kann man im Prinzip eine (beliebig große) Strecke der Länge b ausmessen.

Das gilt nicht mehr, wenn zum Beispiel Leibniz' Infinitesimalien (üblicherweise mit dx bezeichnet) zu den Zahlen gehören; denn auch beliebig große Vielfache von dx

werden niemals größer als 1 (oder irgendeine positive reelle Zahl).

Neben der Nichtstandardanalysis von Abraham Robinson gibt es die Theorie der »smooth infinitesimals« von John Bell und diejenige von Alain Connes, bei der die Kommutativität verloren geht. Die »surrealen Zahlen« von John Conway haben ebenfalls zu Recht ihren Platz in der Mathematik gefunden.

Dennoch sind in keiner dieser Theorien die reellen Zahlen so leicht zu erfassen wie in der klassischen, in der es keine Infinitesimalien gibt. Wer den Umgang mit den unendlich kleinen Zahlen be-

herrscht, kann etliche Beweise einfacher führen. Aber diese Beherrschung ist nicht einfach. Und es gibt, wie gesagt, inzwischen mindestens vier Sorten Infinitesimalien. In dieser Situation erscheint es schwierig, das Konzept wiederzubeleben oder gar im Unterricht einzuführen, auch wenn das bereits versucht wurde.

Keine dieser Theorien liefert übrigens einen klaren Sinn für die Ungleichung $0,999... < 1$. Es scheint unmöglich zu sein, sich ein Kontinuum auszudenken, das uneingeschränkt denjenigen Recht gäbe, welche die Gleichung $0,999... = 1$ bestreiten.

Ein grafischer Beweis

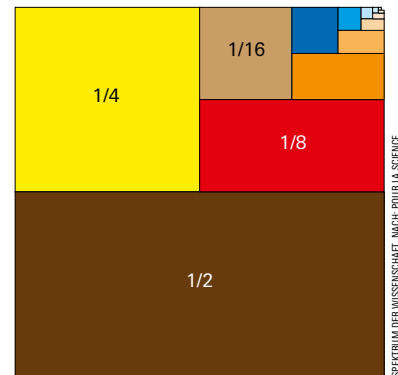
Im Zahlensystem zur Basis 2 lautet die Titelfrage: Ist $0,111\dots$ gleich 1? Die Binärbruchentwicklung $0,111\dots$ ist gleich der unendlichen Summe $1/2 + 1/4 + 1/8 + \dots + 1/2^n + \dots$. In der nebenstehenden Zeichnung hat das große Quadrat die Kantenlänge 1. Diese ist so zerlegt, dass man erkennt, dass die fragliche Summe gleich 1 ist.

Dennoch muss der Skeptiker noch nicht überzeugt sein. In der Tat bedeckt keine der Teilflächen die rechte obere Ecke des großen

Quadrats mit der Seitenlänge 1. Dieser Punkt gehört also gewissermaßen nicht zur Summe.

Demnach wäre 1 die Fläche des Quadrats und $0,111\dots$, im Binärsystem gelesen, die Fläche des Quadrats ohne den rechten oberen Eckpunkt.

Nur ist nach der klassischen Theorie die Fläche eines einzelnen Punkts gleich null. Wer das bestreitet, findet sich in derselben Position wieder wie der aufsässige Schüler.



$$\sum_{n=1}^{\infty} 1/2^n = 1/2 + 1/4 + 1/8 + \dots = 1$$

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH POUR LA SCIENCE

Der Mathematiker Albert Lightstone hat die Theorie dieser Dezimalbruchentwicklungen geschaffen. Der aufsässige Schüler tut also gut daran, seinen ersten Vorschlag zurückzuziehen und stattdessen seine Behauptung $0,999\dots < 1$ auf die Analyse von Lightstone zu stützen. Überdies bilden die Zahlen der Nichtstandardanalysis von Robinson einen Körper, das heißt eine Menge, in der sowohl Addition als auch Multiplikation wohldefiniert sind und die üblichen Rechenregeln gelten. Insbesondere leidet die Theorie nicht unter den Löchern in der Zahlengeraden und den anderen oben beschriebenen Inkonsistenzen.

0,999... ist sehr wohl gleich 1!

Was ist von der Nichtstandardanalysis zu halten? Sollte man mit ihren »hyperreellen Zahlen« an Stelle der klassischen reellen Zahlen arbeiten? Eine Antwort ist schwierig. Nach wie vor legen Verfechter der neuen Theorie in vielen Arbeiten Beweise vor, die in ihren Augen einfacher und direkter sind als die klassischen Beweise für jeweils dasselbe Resultat. Einige vertreten sogar die Auffassung, man sollte die Analysis generell in der Nichtstandardform lehren.

Die Vertreter der Gegenseite haben gegen die Widerspruchsfreiheit der Nichtstandardanalysis nichts einzuwenden – in dieser Hinsicht ist die neue Theorie so gut wie die alte. Sie bezweifeln aber deren Einfachheit. Ein anonymes Mathematiker hat in einer Diskussion über einen einschlägigen Wikipediaartikel den folgenden – für seine Zunft repräsentativen – Kommentar abgegeben:

»Ich gestehe zu, dass die Nichtstandardanalysis ein interessantes Gebiet ist. Das erklärt, warum die informellen Argumente, die sich auf Infinitesimalien stützen, oft zu denselben Resultaten führen wie die strenge Methode mit Epsilon, Delta und Grenzwerten. Dennoch bezweifle ich, dass ihre Beweise einfacher oder klarer sind als die Standardvariante. Das gilt nur dann, wenn wir bereits vom Basislager der Nichtstandardanalysis aufsteigen. Das

erfordert ein hohes Maß an mathematischer Vorbildung. Natürlich kann der Lehrer die Schüler mit dem Hubschrauber ins Basislager schaffen, indem er ihnen sagt: »Vertraut mir, wir könnten das alles streng durchführen, wenn wir nur wollten.« Aber dann ist es wieder nur ein informelles Argument und kein strenger Beweis.«

In den mittlerweile 50 Jahren ihrer Existenz ist es der Nichtstandardanalysis nicht gelungen, sich als Alternative zur klassischen Analysis zu etablieren. Es ist unwahrscheinlich, dass das in naher Zukunft geschehen wird, zumal sie in mehreren konkurrierenden Formen existiert (siehe »Welche Theorie der Infinitesimalien?«, links). Ebenso wenig wie andere Versuche liefert sie ein einfaches Mittel, um die Behauptung $0,999\dots < 1$ aufrechtzuerhalten. Daraus folgt im Gegenzug, dass man $0,999\dots = 1$ akzeptieren sollte. Es ist auch vernünftig anzunehmen, dass die – zuweilen starke – Überzeugung vom Gegenteil nur ein Produkt der Verwirrung ist, die ihrerseits durch eine Notation hervorgerufen wird, die uns fälschlich glauben macht, reelle Zahlen und unendliche Dezimalbrüche seien dasselbe.

Kurzum: Notationen sind wunderbare Hilfsmittel, um die Mathematik zu verstehen und sie voranzubringen. Aber manchmal bringen sie uns eben in Schwierigkeiten! ◀

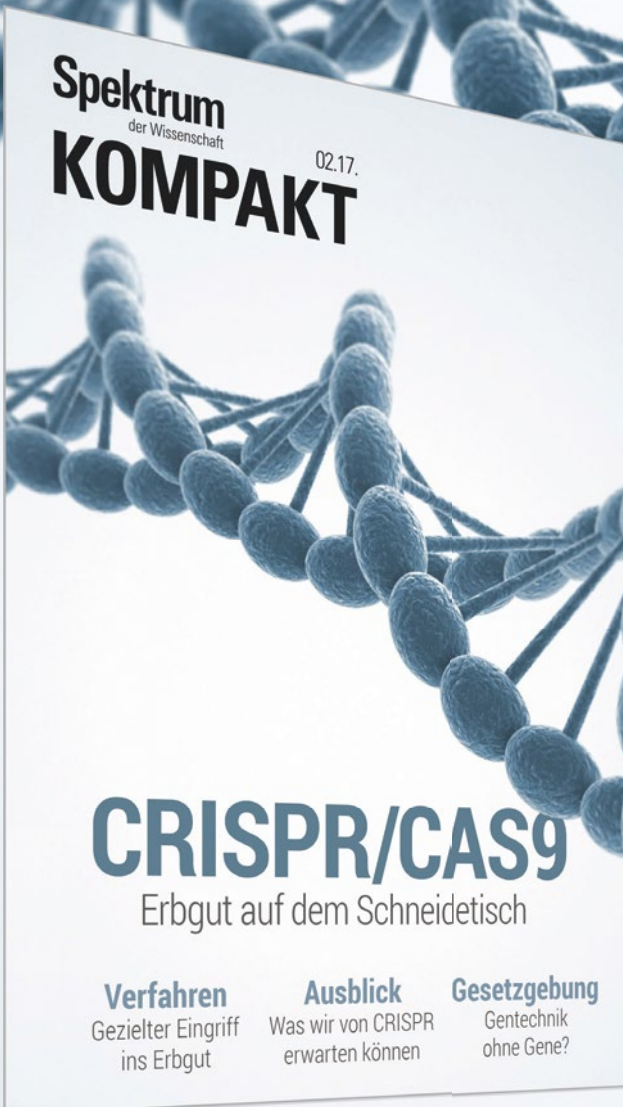
QUELLEN

- Błaszczyc, P. et al.:** Ten Misconceptions from the History of Analysis and their Debunking. In: Foundations of Science 18, S. 43–74, 2013
- Blay, M.:** Deux moments de la critique du calcul infinitésimal: Michel Rolle et George Berkeley. In: Revue d'histoire des sciences 39, S. 223–253, 1986
- Katz, K., Katz, M.:** Zooming in on Infinitesimal 1–9... in a Post-Triumvirate Era. In: Educational Studies in Mathematics 74, S. 259–273, 2010
- Katz, M., Leichtnam, E.:** Commuting and Noncommuting Infinitesimals. In: The American Mathematical Monthly 120, S. 631–641, 2013

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

Ab 24. 3. 2017 bei Ihrem Zeitschriftenhändler!



Spektrum
der Wissenschaft

02.17.
KOMPAKT

CRISPR/CAS9

Erbgut auf dem Schneidetisch

Verfahren Gezielter Eingriff ins Erbgut	Ausblick Was wir von CRISPR erwarten können	Gesetzgebung Gentechnik ohne Gene?
--	--	---

Print | 5,90 €

Download | 4,99 €

TITELBILD: ISTOCK / JEZPERKLAUZEN

www.spektrum.de/aktion/crispr



FREISTETTERS FORMELWELT KEINE RAUMFAHRT OHNE MATHEMATIK

Der neue Kinofilm »Hidden Figures« stellt dar, wie wichtig Zahlen und Formeln sind. Die zugehörige Mathematik ist alt, aber immer noch äußerst aktuell.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.
» spektrum.de/artikel/1438964

Der Film »Hidden Figures« erzählt die Geschichte von drei afroamerikanischen Mathematikerinnen, deren Arbeit für das Raumflugprogramm der NASA maßgeblich war. In einer Schlüsselzene steht Katherine Johnson mit ihren Kollegen vor einer großen Tafel und denkt über die geplante Erdumkreisung von John Glenn nach. Um die komplexen Umlaufbahnen zu beschreiben, müssen die Wissenschaftler zuerst geeignete mathematische Techniken entwickeln. Wenn es die aber noch nicht gibt, so Johnsons Überlegung im Film, dann klappt es vielleicht mit alter Mathematik – wie dieser:

$$y_{k+1} = y_k + hf(t_k, y_k)$$

Ob die Szene aus dem Film so auch in der Realität stattgefunden hat, ist zweifelhaft. In dem Sachbuch »Hidden Figures – Unerkannte Heldinnen« von Margot Lee Shetterly, auf dem der Film basiert, kommt sie nicht vor. Es ist allerdings absolut plausibel, dass Johnson und ihre Kolleginnen obige Formel benutzt haben. Und sie gehört tatsächlich zur alten Mathematik: Sie beschreibt das »explizite Euler-Verfahren«, eines der einfachsten Verfahren zur numerischen Lösung von Differenzialgleichungen. Der Schweizer Mathematiker Leonhard Euler fand es schon 1768.

Unzählige mathematische Probleme laufen darauf hinaus, eine Gleichung zu lösen, in der nicht nur eine unbekannte Variable vorkommt, sondern auch deren Änderungsrate: eine Differenzialgleichung. Die unbekannte Variable ist zum Beispiel die Position der Raumkapsel in Abhängigkeit von der Zeit, und deren Änderungsrate ist die Geschwindigkeit. Solche Gleichungen können enorm schwer lösbar sein. Häufig lässt sich eine exakte Lösung nicht angeben – oder ist so kompliziert, dass man nicht vernünftig mit ihr rechnen kann. Das galt besonders in der Zeit vor der Erfindung schneller Computer, also auch Anfang der 1960er Jahre, als Johnson mit Glens Flug beschäftigt war.

Wo das Manipulieren von Formeln nicht hilft, will man wenigstens durch Rechnen mit Zahlen (»numerisch«) eine Näherungslösung für die Gleichung finden. Das leistet Eulers Verfahren: Man beginnt bei einem Startwert und ersetzt dort die unbekannte Funktion durch eine, die eine simple gerade Linie beschreibt. Dieser Linie folgt man ein Stück und sieht nach, welchen Wert die Funktion am Ende des kurzen Wegs annehmen würde. Diesen Wert verwendet man als neuen Startwert und bestimmt daraus die Richtung, in der man das nächste Stück in gerader Linie läuft. So tastet man sich Schritt für Schritt bis zum Ziel; der Index k an der gesuchten Lösung y beziehungsweise der Zeit t beschreibt die Nummer des jeweiligen Schritts. Je kleiner man die Schrittlänge h wählt, desto genauer wird das Ergebnis, desto mehr Schritte muss man allerdings auch rechnen.

Das Ergebnis wird am Ende mit einem Fehler behaftet sein. Aber dessen Größe kann man mathematisch abschätzen. Heute wie damals führt ein Computer solche Rechnungen ohne Probleme durch. Glenn allerdings war die elektronische Rechenmaschine nicht ganz geheuer. Er bat darum, die ganze Rechnung und die Ergebnisse noch einmal von Katherine Johnson überprüfen zu lassen. Erst als die Mathematikerin zum gleichen Resultat kam wie der IBM-Großrechner, war er zufrieden. Diese Szene aus dem Film fand auch in der Realität statt.

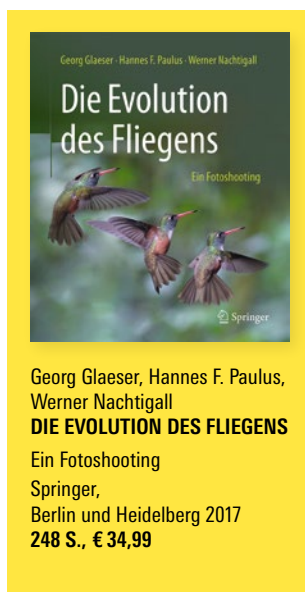
Heute läuft es meistens umgekehrt: Wir trauen den Ergebnissen menschlicher Mathematiker erst, wenn ein Computer sie nachgerechnet hat. Anders ist es auch gar nicht mehr möglich; so könnte kein Mensch mehr die nötigen Rechnungen, um all die komplexen Manöver im Weltall durchzuführen, nur mit Papier und Bleistift bewältigen.

Alte Mathematik wie die von Euler sollte man aber trotzdem noch beherrschen. Denn noch muss irgendwer ja dem Computer sagen, wie er zu rechnen hat.

REZENSIONEN

BIOLOGIE ABGEHOBENES THEMA

Von der Evolution über die Biophysik bis zur Naturfotografie behandelt dieser gelungene Band alles, was man über fliegende Tiere wissen möchte.



»Die Tatsache, dass sich Tiere – und letztlich auch der Mensch – in die Lüfte erheben können (...) übt seit jeher eine enorme Faszination auf uns aus (...) Außerdem ist sie auch typisch für die nahezu unglaubliche Fähigkeit der Evolution, jede nur erdenkliche Nische bis an die Grenzen auszuloten.« Ein Verständnis für diese Fähigkeit und die damit einhergehende Faszination zu vermitteln, darauf zielt dieses Buch ab. Geschrieben haben es der leidenschaftliche Tierfotograf und Mathematiker Georg Glaeser, der erfahrene Evolutionsbiologe Hannes Paulus sowie der Bewegungsphysiologe und

Biophysiker Werner Nachtigall. Ihnen ist ein beeindruckender Bildband mit großartigen Fotos und wissenschaftlich fundierten Erläuterungen gelungen.

Das Werk ist nach Doppelseiten strukturiert, die je einen Aspekt des Fliegens behandeln und lexikalischen Charakter haben. Acht Haupt- und zahlreiche Unterkapitel, die jeweils für sich gelesen werden können, nähern sich dem Thema aus verschiedenen Blickwinkeln: Fliegen aus evolutionärer, biophysikalischer und ökologischer Perspektive etwa sowie aus Sicht des Naturfotografen. Die Bilder sind nicht nur nach biologischen Kriterien angefertigt worden, beispielsweise um eine gute Bestimmbarkeit zu gewährleisten, sondern auch nach künstlerischen oder sogar mathematischen – unter anderem im Hinblick auf Schatten und Spiegelungen. Zum Teil werden sie als verschiedene Entwicklungsphasen des Fliegens einander gegenübergestellt. Dementsprechend heißt es in dem Buch: »Fliegen ist ein sehr dynamischer Prozess, und Flugaufnahmen sind niemals nur schön; sie lassen sich auch vielfältig biologisch und physikalisch interpretieren und enthalten stets auch informative Komponenten, denen nachzuspüren sich lohnt.« Zahlreiche Querverweise und das ausführliche Stichwortverzeichnis erleichtern die Lektüre; Literaturangaben und Internetlinks geben den Lesern die Möglichkeit, sich näher mit dem Stoff zu befassen.

Bereits im Devon, vor 400 Millionen Jahren, entwickelten sich geflügelte In-

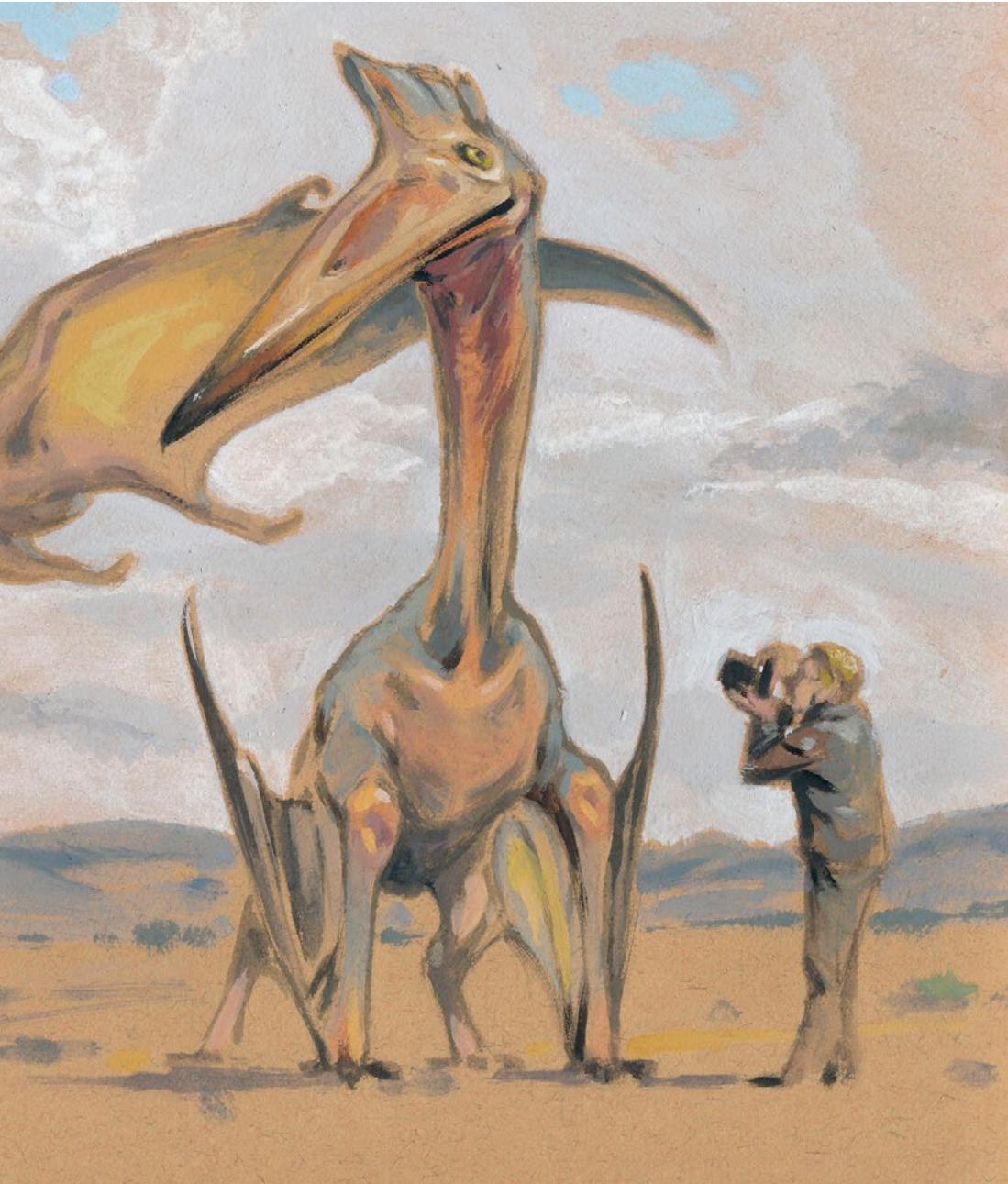


Der Flugsaurier *Quetzalcoatlus northropi* gehörte zu den größten fliegenden Wesen, die je gelebt haben. Er ragte so hoch auf wie eine Giraffe und hatte bis zu 13 Meter Spannweite. Daran gemessen fiel seine Masse mit 100 bis 200 Kilogramm erstaunlich gering aus.

SPRINGER BERLIN HEIDELBERG 2017, AUS: GLAESER, G. ET AL.: DIE EVOLUTION DES FLIEGENS; MIT FRDL. GEN. DES SPRINGER-VERLAGS, BERLIN UND HEIDELBERG

sekten, wie aus dem Buch hervorgeht. 200 Millionen Jahre später tauchten erste Vögel auf und noch einmal 80 Millionen Jahre später die Flugsaurier, von denen die Vögel aber nicht abstammen. Vor etwa 50 Millionen Jahren begannen auch Säugetiere, sich in die Lüfte zu erheben. Von den Systemen des Erdzeitalters über Fossilienkunde, Evolu-

tionstheorie, Genetik bis hin zu biologischen Analogien erörtern die Autoren wesentliche fachliche Grundlagen. Weiter hinten im Buch erfahren die Leser, worauf es ankommt, wenn man Tiere im Flug fotografieren möchte – demonstriert anhand faszinierender Aufnahmen. Um komplexe Bewegungsabläufe zu analysieren, genügen manch-



SPRINGER BERLIN HEIDELBERG 2017, AUS: GLAESER, G. ET AL.: DIE EVOLUTION DES FLIEGENS, MIT FRDL. GEN. DES SPRINGER-VERLAGS, BERLIN UND HEIDELBERG

mal Schnappschüsse. Oft benötigt man aber spezielle Techniken wie das Verschmelzen aufeinander folgender Belichtungen mit sehr kurzen Zeitabständen (»multiple Bilder«). So zeigen Hochgeschwindigkeitsfotos senkrechte Blitzstarts von Möwen oder auch Rivalenkämpfe von Fluginsekten. Zeitlupenaufnahmen stellen unter

anderem das Flugverhalten von Fliegen und Heuschrecken dar. Selbst erfahrene Fotografen bekommen in diesem Abschnitt wertvolle Tipps, etwa zum »Rolling-Shutter-Effekt«.

Wer sich aus biophysikalischer Sicht mit dem Thema beschäftigt, ist erstaunt, wie viele technische Probleme ein fliegendes Lebewesen über-

winden muss. Der Evolution sind hier enge physikalische Grenzen gesetzt, wie die Autoren darlegen. Sie vermitteln physikalische Grundkenntnisse zu Bewegungslehre, Hub-Erzeugung an Flügeln, Luftkräften und Flügelmorphologie, zu Koordination und Rhythmik flügel-schlagender Organismen. Als Leser sollte man über

einige mathematisch-physikalische Vorkenntnisse verfügen, um den Ausführungen folgen zu können – etwa bezüglich der Reynolds-Zahl.

Ein großer Abschnitt widmet sich den Mechanismen der Evolution und behandelt unter anderem die sexuelle Selektion sowie den Einfluss von Klimaänderungen. Ein weiterer nimmt die Insekten als erste Flugtiere und erfolgreichste Wirbellose in den Blick. Kapitel über Vögel als »klassische Flugtiere«, über fliegende Säuger und die Faszination des Fliegens runden das Werk ab. »Wer nicht vom Fliegen träumt, dem wachsen keine Flügel«, schrieb der Schweizer Lyriker Robert Lerch – und wer es tut, der findet (fast) alles Wissenswerte zum Thema in diesem Band. Wann, wie oft unabhängig voneinander und woraus haben sich Flügel entwickelt? Wie sind Federn entstanden? Mit welchen Methoden lässt sich der Luftwiderstand überwinden? Was ist die Höchstgeschwindigkeit im Sturzflug? Warum sehen Adler so scharf? Auf diese und etliche andere Fragen liefert das Buch Antworten.

Das in jeder Hinsicht großartige Lese-, Schau-, Lehr- und Nachschlagebuch lässt in Bild und Text kaum Wünsche offen. Nur ein größeres Buchformat und eine entsprechend größere Schrift hätten den Lesegenuss noch steigern können. Der Band lässt sich allen einschlägig Interessierten empfehlen.

Gerfried Pongratz ist Phytopathologe und Yakzüchter in Osterwitz bei Deutschlandsberg (Österreich).

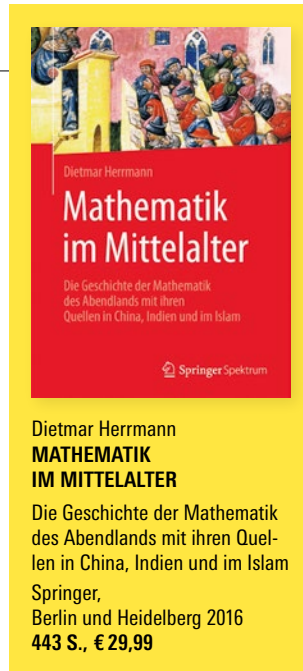
MATHEMATIK FEDERKIEL UND ABAKUS

In den Jahren von 500 bis 1500 profitierte die europäische Mathematik nicht nur von islamischen Einflüssen, sondern auch von solchen aus Byzanz und Indien.

► Dietmar Herrmann ist Mathematiker, Physiker und hat als Lehrbeauftragter an der Fachhochschule München gearbeitet. Jetzt im Ruhestand, beschäftigt er sich mit Themen aus der Geschichte der Mathematik. Nachdem er vor einigen Jahren umfangreich die Leistungen griechischer Mathematiker darstellte (»Die antike Mathematik«, 2014), widmet er sich in seinem

neuen Buch dem Mittelalter. Es gelingt ihm zu zeigen, wie die Mathematik in Europa damals langsam aus einem »Dornröschenschlaf« erwachte, in den sie nach dem Zusammenbruch der antiken Großkulturen gefallen war.

Dies erreicht der Autor nicht so sehr, indem er historische Entwicklungen allgemein beschreibt, wie es etwa Hans Wussing in »6000 Jahre Mathematik« (2009) getan hat. Herrmanns einführende Texte fallen hier etwas kurz aus. Vielmehr trägt er hunderte Aufgaben aus zahlreichen Schriften jener Epoche zusammen – etliche von ihm selbst übersetzt. Hierin liegt das besondere Verdienst des Werks. Ein Beispiel: »Item es waren 2 Posten. Einer ging von Wien gegen Regensburg in 8 und der andere ging von



Regensburg gen Wien in 5 Tagen. In wie viel Tagen kommen sie gegeneinander oder zusammen?«
Leser können sich anhand der vielen Aufgaben unterschiedlicher Schwierigkeitsgrade ein Bild davon machen, womit sich die

Mathematiker im Mittelalter beschäftigt haben. Leider wird nicht immer deutlich, welche der angegebenen Lösungen von den ursprünglichen Autoren stammen und welche von Herrmann. Es wäre durchaus Gewinn bringend gewesen, häufiger als im Buch vorgesehen die heutigen mit den damaligen Lösungswegen zu vergleichen. Aber vielleicht wollten Autor und Verlag den Umfang des Werks nicht noch mehr ausweiten.

Einen Vorgeschmack auf die inhaltliche Vielfalt vermittelt bereits das erste Kapitel mit der Einleitung. Hier zeigt der Autor auf, dass bestimmte Probleme, etwa Bewegungsaufgaben oder das Aufteilen von Dingen, in verschiedenen Kulturen anscheinend unabhängig voneinander auftauchten. Der Mathema-



Pacino di Bonaguida
BUCH DER BILDER

Originalgetreue Faksimile-Edition der Handschrift aus New York, The Morgan Library, M.643, entstanden um 1320/30 in Florenz. 19 Blatt, mit wissenschaftlichem Begleitband von 92 S.

Müller und Schindler
€ 3900,-

KUNSTGESCHICHTE WISSENSCHAFTSHISTORIE IM ABRISS

Kleinod spätmittelalterlicher Buchkunst – ein Miniaturenbuch ohne Text.

► Am Ende des Mittelalters erschien in Florenz eine bis dahin einzigartige Handschrift, die im Gegensatz zur gängigen Praxis der Buchmalerei keinerlei Text enthielt. Der Künstler Pacino di Bonaguida (nachgewiesen in Florenz um 1280 bis 1340) kombinierte darin wichtige Szenen aus dem Leben Christi mit alttestamentarischen Inhalten und Bildern aus der Vita des Franziskanermönchs Gerhard von Villamagna. Gestiftet wurde das Werk von der reichen Bankiersfamilie der Bardi aus Florenz für eine Betkapelle zu Ehren dieses Heiligen.

Nun ist eine Faksimile-Edition erschienen, die zum ersten Mal diese 38 Miniaturen, deren Originale sich in der Morgan Library in New York befinden, einem größeren Publikum vorstellt. In leuchtenden Farben, versehen mit echtem Blattgold, präsentiert das Werk die zarte Eleganz und kraftvolle Figurenbehandlung, über die Bonaguida verfügte. Der Florentiner war sichtlich beeinflusst von der damals führenden französischen Buchmalerei, aber auch von seinem Landsmann Giotto di Bondone (um 1267–1337), der als wichtiger Wegbereiter der italienischen Renaissance gilt, da er plastisch modellierte Individuen in einem perspektivischen Raum zu inszenieren vermochte. Die Ausgabe richtet sich an Buchliebhaber und solche, die sich für italienische Kunst an der Schwelle vom Mittelalter zur Neuzeit interessieren. Susanne Kaeppele

tikhistoriker Frank J. Swetz bezeichnet sie als »Fußspuren der Mathematikgeschichte«. Herrmann stellt außerdem heraus, wie das bereits von den Babyloniern angewendete Lösungsverfahren der »regula falsi« (aus einem zu großen und einem zu kleinen Wert ermittelt man durch Inter-

hatten das Vermächtnis der Griechen nicht nur »verwaltet«, also vor dem Vergessen bewahrt, sondern in allen Bereichen weiterentwickelt. Mit der Übernahme der indischen Zifferschreibweise und des Stellenwertsystems traten die Gelehrten in Bagdad, Kairo, Samarkand und an

Wissenschaftler des islamischen Kulturkreises hatten das Vermächtnis der Griechen umfassend weiterentwickelt

polation eine Näherungslösung) über die Jahrtausende hinweg seine Bedeutung beibehielt.

Überraschenderweise findet sich am Ende des ersten Kapitels eine Zusammenfassung des Buchinhalts; erwartet hätte man sie eher im Vorwort.

Im Folgenden behandelt der Autor, wie sich die Mathematik in verschiedenen Regionen entwickelt hat. Einzelne Kapitel heben auf besondere Themen ab, etwa auf die Vorgänge in Klöstern, Schulen und Universitäten. Herrmann beleuchtet die Quellen, aus denen sich die Wissenschaftsdisziplin speiste, die ab dem Jahr 1200 in Europa aufblühte – und stellt den bedeutendsten Mathematiker im mittelalterlichen Europa vor, den Italiener Leonardo von Pisa (genannt Fibonacci, 1170–1240). Unmittelbaren Einfluss auf ihn hatten Mathematiker der Mittelmeeranrainerstaa-ten, vom islamisch geprägten Spanien über Byzanz bis hin zu den Ländern des vorderen Orients.

Die Wissenschaftler des islamischen Kulturkreises

anderen Orten auch das Erbe der indischen Mathematiker Aryabhata und Brahmagupta an.

Insofern ist es sinnvoll, wenn der Autor die Leistungen indischer Mathematiker vor den Entwicklungen in der islamischen Welt behandelt. Ob es einen Einfluss der chinesischen Mathematik auf jene in Indien, im Orient oder gar in Europa gab, spricht er nicht an. Deshalb wirkt seine Darstellung darüber, wie sich die Disziplin in dem fernöstlichen Kaiserreich bis 1400 entwickelte, etwas isoliert. Andererseits erscheint sie schon wegen der Gefahr des Eurozentrismus gerechtfertigt.

Man kann verschiedener Meinung darüber sein, wann die mittelalterliche Mathematik endete und die neuzeitliche begann. Herrmann lässt seinen Exkurs in der Mitte des 16. Jahrhunderts enden, als in Italien die erste Auflage der »Ars Magna« von Girolamo Cardano erschien (1545) und im deutschen Sprachraum die »Coß« des Adam Ries (1550).

Positiv hervor stechen die umfangreichen Literaturhinweise am Ende jedes Kapitels sowie am Buchende. Als hilfreich erweisen sich auch die geometrischen Figuren, die mathematische Sachverhalte veranschaulichen. Allerdings sind sie manchmal etwas groß geraten, so dass sie erst auf der jeweiligen Folgeseite erscheinen. Das Stichwortverzeichnis fällt trotz eines Umfangs von sieben Seiten etwas zu knapp aus, gemessen an der inhaltlichen Fülle des Buchs.

Mit seinem umfangreichen Aufgabenmaterial ist das Werk eine wichtige Ergänzung zur Springer-Buchreihe »Vom Zählstein zum Computer«, die sich mit Mathematikgeschichte befasst. Es richtet sich an historisch einschlägig interessierte Leser sowie an solche, die Freude am Lösen entsprechender Aufgaben haben.

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

MATERIAL-FORSCHUNG IM REICH DER STOFFE

Zugfester Stahl, dauerhafter Beton und schmackhafte Pralinen haben eines gemeinsam: Um sie herzustellen, braucht man die Materialkunde.

▶ Warum schmeckt die eine Schokoladensorte besser als die andere,

und was unterscheidet einen Kassenzettel von Klopapier? Wie ist selbstheilender Beton aufgebaut, und stimmt es, dass sich Weltraumstaub mit Aerogelen einsammeln lässt? Weshalb ist Glas durchsichtig? Fragen über Fragen, die der englische Materialforscher Mark Miodownik auf äußerst unterhaltsame Weise beantwortet. Manchmal erzählt er eine dramatische Geschichte, dann wieder pflegt er einen nüchternen, wissenschaftsnahen Stil oder bezieht Kulturelles beziehungsweise Persönliches ein.

Mit einem wiederkehrenden Foto demonstriert der Autor, wie sehr Materialien unsere Umwelt prägen. Darauf sieht man ihn auf einer Dachterrasse sitzen und einen Kaffee trinken, mit einem Stück Schokolade vor sich auf einem runden Beistelltisch. Im Verlauf des Buchs erscheinen nach und nach



Mark Miodownik
WUNDERSTOFFE

Zehn Materialien, die unsere Zivilisation ausmachen
Aus dem Englischen von Jürgen Neubauer

DVA, München 2016
304 S., € 19,99

REZENSIONEN

weiße Schriftzüge auf den Alltagsgegenständen, die auf verborgene Materialien hinweisen. Sie leiten die jeweils anschließenden Kapitel ein. So führt der Autor durch die verschiedenen Abschnitte, bis am Ende des Buchs das Foto fast komplett übermalt ist.

Miodowniks Interesse für Materialkunde begann mit einem unerfreulichen Ereignis: einer Rasierklingenattacke. Er war als Schüler mit dem Bus unterwegs, als ihm beim Einsteigen jemand eine Wunde am Rücken zufügte. Der Autor verstand nicht, wie eine briefmarkengroße Klinge sowohl Lederjacke als auch Schuluniform, Pullover und Weste durchdringen und dann immer noch schneiden konnte. Diese Episode nimmt er zum Anlass, um sein erstes Kapitel mit der Geschichte des Stahls zu beginnen. Er schildert, wie die Zusatzstoffe Kohlenstoff und

der Erde vergraben, damit die Feinde sie nicht finden konnten.

Weiter hinten lüftet Miodownik das Geheimnis gut schmeckender Schokolade. Die langkettigen Fette der Kakaobutter sind so genannte Triglyceride (Ester des Glycerins mit je drei Fettsäuremolekülen). Je nachdem, wie dicht die Fettsäuren in der Schokolade gepackt sind, schmelzen sie im Mund früher oder später und setzen dann gezielt die Aromen der Kakaobohne frei. Schokoladenproduzenten sollten dies beachten. Triglyceride für edle Sorten brauchen bei der Herstellung nämlich etwas länger, um zu entstehen. Je mehr Zeit sich also der Hersteller für den Produktionsprozess nimmt, umso mehr ist von den dichter gepackten und geschmacklich ansprechenderen Molekülen enthalten.

Im Kapitel über Beton erklärt der Autor, wie sich

denn ihr größter Feind ist der Betonfraß. Feine Risse in dem Werkstoff führen dazu, dass das innen liegende Stahlskelett rostet, insbesondere bei Einwirkung von Salzwasser. Die Risse werden mit der Zeit größer, bis irgendwann die gesamte Struktur kollabiert. Vor Kurzem haben Forscher Bakterien entdeckt, mit denen man diesem Verfall entgegenwirken kann. Sobald ein Riss entsteht und Wasser eintritt, beginnen die Mikroben, Kalk zu produzieren und damit die Schadstelle wieder zu verschließen.

Wenn er sich dem Papier zuwendet, verrät Miodownik, was Kassenzettel, Klopapier, Teebeutel und Geschenkkartons voneinander unterscheidet. Kassenpapier ist demnach ein so genanntes Thermopapier, das seine »Druckertinte« bereits unsichtbar in sich trägt. Beim Drucken wird der Stoff an ausgewählten Stellen erhitzt, worauf eine Reaktion in Gang kommt und das Papier dort schwarz wird. Klorollen hingegen enthalten meist noch nicht einmal einen Weißmacher, wie der Autor verrät. Auch schildert er, wie man Banknoten mit Jod auf Echtheit überprüfen kann.

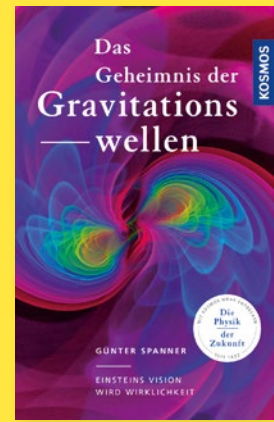
Fotos, Zeichnungen und chemische Formeln bebildern das allgemein verständliche Buch. Es gewährt aufschlussreiche Einblicke in die Materialwissenschaften und bietet abwechslungsreichen sowie unterhaltsamen Lesegenuss.

Katja Maria Engel ist promovierte Ingenieurin der Werkstoffwissenschaften.

Für die Zukunft hoffen Baumeister und Architekten auf selbstheilenden Beton. Bakterien sollen entstehende Risse wieder verschließen

Chrom dem kristallinen Eisen unter anderem Härte, Rostbeständigkeit oder Flexibilität verleihen. Auch erklärt er, wie Rasierklingen früher an einem Leder geschärft wurden, indem man ein Keramikpulver zugab. Die historische Bedeutung des Eisens macht er am Beispiel der Römer klar, die auf der Flucht vor den Pikten (Völkern im heutigen Schottland) ihre Eisennägel tief in

bei dessen Aushärten Kalziumsilikat-Nadeln verhaken, das Wasser einschließen und dabei ein labberiges Gel in festen Stein verwandeln. Einmal von den Römern erfunden, beflügelte der Stoff die Fantasie der damaligen Ingenieure, so dass sie atemberaubende Bauten wie das Pantheon errichteten. Für die Zukunft hoffen Baumeister und Architekten auf selbstheilenden Beton,



Günter Spanner
**DAS GEHEIMNIS
DER GRAVITATIONSWELLEN**
Einsteins Vision
wird Wirklichkeit
Kosmos, Stuttgart 2016
286 S., € 19,99

PHYSIK SCHWINGENDE RAUMZEIT

Ein spannendes, populärwissenschaftliches Werk über die Erforschung der Gravitationswellen.

Der 14. September 2015 war ein besonderer Tag in der Geschichte der Physik. Er brachte den lang ersehnten direkten Nachweis von Gravitationswellen. Das sensationelle Ergebnis wurde allerdings fünf Monate lang geheim gehalten und erst am 11. Februar 2016 offiziell verkündet. Nicht die lange Wartezeit ist erstaunlich – man benötigte sie, um die Daten zu prüfen und jeden erdenklichen Fehler auszuschließen –, sondern dass die rund 1000 weltweit beteiligten Wissenschaftler so lange dichtgehalten haben. Offenbar steckte ihnen noch der Schock vom März 2014 in den Knochen.

Damals hatten Kollegen voreilig gemeldet, Gravitationswellen des Urknalls im kosmischen Mikrowellenhintergrund nachgewiesen zu haben. Ein peinlicher Fehler, denn wie sich bald herausstellte, war eine banale »Verschmutzung« in Form kosmischen Staubs die Ursache. Statt des erhofften Nobelpreises gab es weltweit Hohn und Spott.

Der Physiker Günter Spanner hat nun dieses populärwissenschaftliche Buch zum Thema vorgelegt. Er befasst sich seit 15 Jahren als Experte für optische Messtechnik mit Gravitationswellenforschung. Teile des Manuskripts lagen wohl schon in seiner Schublade, schließ-

lich war die Entdeckung der Raumzeitwellen lange erwartet worden. Das Buch ist jedenfalls sorgfältig geschrieben, wirkt überaus kompetent und lässt nichts Wesentliches aus. Spanner geht ausführlich auf die physikalischen Grundlagen und technischen Aspekte des anspruchsvollen Themas ein, und er schildert seine eigenen Erlebnisse als Teilnehmer sowie die seiner Kollegen. Besonders unterhaltsam stellt er das Geschehen am Tag der Entdeckung und die aufregende Zeit danach dar.

Was ist an Gravitationswellen so besonders? 1864 sagte der schottische Physiker James Clerk Maxwell, basierend auf seiner Theorie der Elektro-

dynamik, die elektromagnetischen Wellen voraus. Sie wurden 19 Jahre später von dem deutschen Physiker Heinrich Hertz experimentell nachgewiesen. Bei den Gravitationswellen hat die empirische Bestätigung fast 100 Jahre auf sich warten lassen; bereits 1916 hatte Albert Einstein im Rahmen seiner allgemeinen Relativitätstheorie postuliert, dass es solche Raumzeitschwingungen geben müsse. Der Grund für die Verzögerung ist simpel: Gravitationswellen sind extrem schwach und kaum messbar. Die Stärke der Gravitation ist um den gewaltigen Faktor 10^{39} kleiner als die der elektromagnetischen Wechselwirkung – eine Eins mit 39 Nullen. Für uns

macht sie sich, in Form der Erdanziehung, überhaupt nur deshalb bemerkbar, weil die Masse unseres Planeten so enorm groß ist.

Gravitationswellen werden von beschleunigt bewegten Körpern verursacht, wie Spanner in seinem Werk darlegt. Ein klassisches Beispiel hierfür ist ein enges Doppelsternsystem. Die von ihm verursachten Raumzeitstörungen breiten sich wellenförmig mit Lichtgeschwindigkeit aus. Auf ihrem Weg verändern sie Abstände zwischen Körpern und auch deren Ausdehnung selbst. Überstreicht beispielsweise eine Gravitationswelle das Sonnensystem, so variiert kurzzeitig die Entfernung zwischen Erde und Sonne.

Spektrum
der Wissenschaft

SCHREIBWERKSTATT

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

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

Ort: Heidelberg

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

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



Volker Reinhardt
PONTIFEX
 Die Geschichte der Päpste. Von Petrus bis Franziskus
 C.H.Beck, München 2017
 928 S., € 38,-

RELIGIONSGESCHICHTE GOTTES STELLVERTRETER

Die 2000-jährige Historie des Papsttums – spannend nacherzählt.

Unbeweglich wie ein Fels und doch stets wandelbar: Das Papsttum ist die erstaunlichste Institution der Weltgeschichte. Nicht nur wegen seiner Langlebigkeit, sondern auch wegen seiner Doppelnatur zwischen Himmel und Erde. Der Papst ist das geistliche Oberhaupt einer Weltreligion und zugleich weltlicher Souverän, der an internationalen Konferenzen teilnimmt und Verträge schließt.

Neuzeithistoriker und Vatikan-Experte Volker Reinhardt stellt diese »Holding«, die in den zwei Jahrtausenden ihres Daseins alle Epochen überdauert hat, in seinem mehr als 900 Seiten starken Werk umfassend dar. Die von den Päpsten geführte katholische Kirche entstand in der Antike, dominierte das Mittelalter und ist bis heute eine mächtige Institution geblieben, weil sich die »Stellvertreter Gottes auf Erden« durch Unterdrückung, Beharren und Veränderung der diesseitigen Welt zu stellen wussten. So erkannte ausgerechnet Innozenz III. (1160–1216), der den päpstlichen Weltherrschaftsanspruch auf die Spitze trieb, die Franziskaner als Ordensgemeinschaft an – und vereinnahmte so die geistliche Strömung eines gottgefälligen Lebens in Armut für die Kirche. Der gewaltsame Kampf gegen Abweichler (Häretiker) hingegen fand einen seiner traurigen Höhepunkte in der Verfolgung der Katharer, die erbarmungslos abgeschlachtet wurden.

Dem Autor ist ein Buch gelungen, das sich trotz seines gewaltigen Umfangs höchst spannend und gut verständlich präsentiert und dem viele Leser zu wünschen sind. Theodor Kissel

Der Effekt ist aber extrem klein: Die Distanz zwischen beiden Himmelskörpern, etwa 150 Millionen Kilometer, verändert sich dabei um einen zehnmilliardstel Meter, was dem Durchmesser eines Atoms entspricht. So genau muss man also mindestens messen, um das Phänomen experimentell zu bestätigen – lange Zeit eine utopische Aufgabe.

Einstein war sich des Problems bewusst und bezweifelte deshalb, dass der Nachweis der Wellen gelingen könne. Zeitweise war er sogar von seiner eigenen Theorie nicht überzeugt. Erst nach Einsteins Tod gelang es, diese mathematisch sauber zu formulieren. Das motivierte Experimentatoren wie den amerikanischen Physiker Joseph Weber dazu, sich

bereits in den 1960er Jahren an Gravitationswellenexperimente zu wagen. Der Misserfolg war programmiert – das wird bei der Lektüre klar.

Immerhin gelang den (Astro-)Physikern Russell Hulse und Joseph Taylor 1974 ein indirekter Nachweis. Sie erklärten die schwindende Umlaufzeit eines Systems zweier Neutronensterne mit der Abstrahlung von Gravitationswellen. Dafür erhielten sie 1993 den Nobelpreis. Den endgültigen Durchbruch brachte erst das neue Jahrtausend: Kilometergroße Laser-Interferometer sind in der Lage, kleinste Längenänderungen nachzuweisen. Solche Anlagen stehen in den USA, Italien, Japan und Deutschland. Der Autor hat diese Entwicklung hautnah miterlebt

und beschreibt die Methoden und Detektoren klar und für Laien verständlich, illustriert mit Bildern und Grafiken.

Die direkte Messung von Gravitationswellen gelang schließlich mit zwei nahezu identischen Anlagen (LIGO) in den USA, nachdem deren Empfindlichkeit mit deutschem Knowhow deutlich gesteigert werden konnte. Insbesondere haben Forscher und Ingenieure dabei die Herausforderung gemeistert, äußere Störfaktoren auszuschalten. Als die Welle aus dem Kosmos die beiden L-förmigen Interferometer überstrich, verformten sie sich in gleicher Weise, lediglich verzögert durch ihren Abstand von 3000 Kilometern. Was dann geschah und wie die Mitarbeiter reagierten, schildert Spanner in seinem Buch

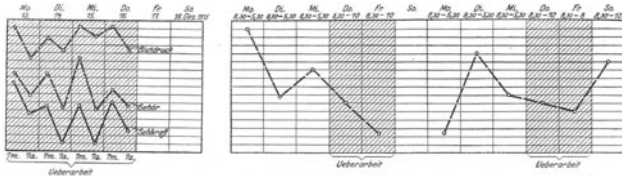
sehr packend und unterhaltsam. Er befasst sich auch ausführlich mit der Ursache des Ereignisses – es waren wieder einmal Schwarze Löcher. Diese Erkenntnis basiert auf jahrzehntelanger interdisziplinärer Forschung, die viele Fachgebiete, von Mathematik bis Lasertechnik, nachhaltig beeinflusst hat.

Mit dem Nachweis der Wellen hat sich ein neues Fenster der Astronomie geöffnet, das tiefe Einblicke in den Kosmos erlaubt. Wie es möglicherweise weitergeht und welche spannenden Entdeckungen noch auf uns warten könnten, verrät dieser lesenswerte und aufschlussreiche Band.

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

1917

WARUM DER SONNTAG HEILIG SEIN SOLLTE



Mehrarbeit schwächt die Leistung von Arbeitern und Beamten.

»In normalen Zeiten findet die schwächer werdende Leistungsfähigkeit einen Ausgleich in der Ruhe am Samstagnachmittag und Sonntag, die jedoch bei Sonntagsarbeit fortfällt, so daß der Zustand der Ermüdung am Ende der zweiten Arbeitswoche erheblich gesteigert ist. Schreitet der Prozeß weiter fort, so wird der Arbeiter unter dem Druck der dauernden Arbeit zusammenbrechen oder in einen Zustand versetzt werden, der von dem Gesichtspunkte der Arbeitsleistung und dem der Gesundheit gefahrbringend erscheint. Ein ähnliches Ergebnis zeitigten Versuche über ein tägliches Überarbeiten.«

Prometheus 1435, S. 479

KUNST LIEGT IN DER FAMILIE

»Untersuchungen in mehreren Künstler- und Musikerfamilien haben ergeben, daß, wenn beide Eltern Künstler sind, das Talent sich auf sämtliche Kinder vererbt. Nicht künstlerisch veranlagte und nicht musikalische Eltern haben dagegen nie talentvolle Kinder. Dr. Drinkwater schließt daraus, daß künstlerische und musikalische Veranlagung ein rezessives Mendelsches Merkmal ist.«

Die Umschau 15, S. 296

WEIN PRÜFT ALKALITÄT

»Hippokrates erwähnt, daß sich weiches Wasser von hartem dadurch unterscheidet, daß es von kleinen Mengen Rotwein gefärbt wird. Diese Bemerkung des Hippokrates macht verständlich, daß die Römer bei der Prüfung des Wassers nach wissenschaftlichen Grundsätzen verfahren. Setzt man dem Wasser vorsichtig kleine Mengen Rotwein zu, so findet man, daß dieser um so vollständiger entfärbt wird, je mehr alkalische Salze das Wasser enthält. Diese Beobachtung führte dazu, einer bestimmten Wassermenge in einem weißen Gefäß tropfenweise Rotwein zuzusetzen und die Zahl der zur Erzielung einer bestimmten Rotfärbung erforderlichen Tropfen zu messen. Benutzt man bei diesem Verfahren einen und denselben Rotwein, so erhält man einen Maßstab für die Alkalität des Wassers.«

Central-Zeitung für Optik und Mechanik 37, S. 136

1967



Geier zertrümmern Straußeneier.

SCHLAUE GEIER

»Der Gebrauch von Steinen zum Aufbrechen von Straußeneiern wurde beim Schmutzgeier in Ostafrika beobachtet. Die Verwendung natürlicher Objekte

als Werkzeuge durch freilebende Wirbeltiere ist bislang nur für vier Arten bekannt: Schimpanse, Gorilla, kalifornischer Meerotter und der Galapagos-Spechtfink. Die Vögel nahmen einen Stein mit dem Schnabel auf und warfen [ihn] mit einer kräftigen Kopf- und Halsbewegung in Richtung auf das Straußenei. Dieser Vorgang wurde wiederholt, bis die Schale gebrochen war, dessen Inhalt verzehrt wurde. Die Steine waren 57 bis 284 Gramm schwer.«

Naturwissenschaftliche Rundschau 4, S. 173

ELEKTRONENGEHIRN LIEST BIBEL

»Zur Lösung einer Aufgabe aus der vergleichenden Textkritik soll nunmehr eine elektronische Maschine verwendet werden, und zwar zur Untersuchung der Lesarten des griechischen Neuen Testaments. Reverend John W. Ellison hat 311 Manuskripte ausgewählt und will nun vier Kapitel des Lukas-Evangeliums durch das Elektronengehirn vergleichen lassen. [Er] hofft, im Verlauf eines Jahres die 311 Manuskripte in Gruppen einteilen zu können, die auf die gleiche Quelle zurückgehen, und dadurch einen gewaltigen Fortschritt in der Exegese des Neuen Testaments zu erzielen.«

Neuheiten und Erfindungen 368, S. 59

RISIKOSPORTART BALLETT

»Der Ballettanz verlangt ein Auswärtsdrehen der Hüften (en-dehors). Die Ursache der meisten Ballettschäden ist nicht dieses En-dehors der Beine selbst. Bei mangelhaft ausgedrehten Hüften wird das Bein im Knie- und im Fußgelenk verdreht, um ein vollkommenes En-dehors vorzutäuschen. Diese vorgetäuschte En-dehors-Stellung bewirkt eine übermäßige Beanspruchung der Meniskus-scheiben und führt auf die Dauer zu ihrer Degeneration.«

Die Umschau 7, S. 232



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 2.200 Profilen herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature

INSPIRIERENDES BILD

Im Titelthema des Februarhefts beschreibt der Physiker Juan Maldacena, wie sich am Beispiel von Wurmlöchern die Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik zusammenführen ließe (»Verschränkte Schwarze Löcher«, Spektrum Februar 2017, S. 12).

Kai Spitzley, Rommerskirchen: Selten hat mich das Titelbild von *Spektrum* dermaßen inspiriert. Sofort hatte ich dabei das Bild im Kopf, welches oft zur Veranschaulichung von Wurmlöchern genutzt wird: das gefaltete, von einem Bleistift durchstochene Blatt Papier – zuletzt im Film »Interstellar« oder auch in Edwin Abbots Buch »Flatland«.



Das Beispiel erläutert, wie zwei auf den ersten Blick weit entfernte Punkte in einer höheren Dimension doch sehr nahe sein können.

Was also, wenn die »spukhafte Fernwirkung« der Quantenverschränkung gar keine Fernwirkung ist? Die verschränkten Teilchen

liegen in einer höheren Dimension vielleicht gar nicht weit auseinander oder sind sogar identisch. So wie sich die zweidimensionalen Bewohner in Flatland wundern, warum beide Punkte (des durch das gefaltete Blatt gesteckten Bleistifts) trotz großer Entfernung wackeln, obwohl man nur an einem rüttelt, so wundern wir uns womöglich über die Fernwirkung, wenn wir nur an einem der verschränkten Teilchen »rütteln«. Was für eine verlockend elegante Idee!

Auch wenn manche Stimmen sagen, dass trotz immer aufwändigerer Forschung der Erkenntnisgewinn immer geringer wird, bin ich weiterhin optimistisch, dass große Schritte nach wie vor möglich sind. Vielleicht beträgt der nächste große Schritt nur wenige Millimeter – aber in eine andere Richtung als erwartet.

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.

VERBORGENER BIAS?

Manchmal können statistische Daten zu widersprüchlichen Schlüssen führen. Der Informatiker Jean-Paul Delahaye erläuterte, wieso (»Das beunruhigende Paradox von Simpson«, Spektrum Februar 2017, S. 70).

Reiner Zorn, Köln: Hier scheint mir kein Paradox vorzuliegen, sondern nur ein subtiler Fall von statistischer Verzerrung (»statistical bias«). Im Beispiel des Artikels ist zwar die Hälfte aller Personen männlich, und die Hälfte hat das Medikament bekommen, aber unter den Männern haben 75 Prozent das Medikament bekommen, unter den Frauen nur 25 Prozent. Fordert man, dass in allen Untergruppen (männlich/weiblich, Augenfarbe) das Medikament mit gleicher Wahrscheinlichkeit gegeben wird, zeigt eine einfache Rechnung, dass das Paradox nicht auftreten kann.

Man könnte jetzt argumentieren, dass bei der Konzeption einer Studie nicht alle relevanten Unterkriterien bekannt sind, also die gleich wahrscheinliche Zuordnung des Medikaments nicht gewährleistet ist. Dies sollte sich aber bei einer zufälligen Zuordnung von Medikament und Placebo im Grenzfall großer Probandenzahlen automatisch ergeben. Schon die Zuordnung im Beispiel hier (60/20 bei Männern und 20/60 bei Frauen) oder eine noch extremere kann zufällig nur mit einer Wahrscheinlichkeit von $4 \cdot 10^{-11}$ auftreten (kumulierte Verteilungsfunktion der Binomialverteilung für zwei Größen). Das heißt, das gegebene Beispiel kann eigentlich nur durch »böse Absicht« zu Stande kommen.

Antwort des Autors Jean-Paul Delahaye: Ich bezweifle nicht, dass man dem Simpson-Paradox und seinen Varianten entgeht, indem man Bedingungen an die Größe der Teilgruppen stellt. Das ist sogar relativ einfach zu beweisen. Es geht nur darum, sich das Paradox bewusst zu machen, damit man sich die richtigen Regeln zu seiner Vermeidung geben kann.

Hinweis der Redaktion: Die Beispiele im Kasten auf S. 72 zeigen, dass eine ungleichmäßige Verteilung der Fallzahlen auf die Untergruppen vorkommt und nicht durch einen geeigneten Experimentaufbau zu vermeiden ist (schon weil es sich nicht um kontrollierte Experimente handelt).

ERRATUM

»Wann erreichten die ersten Menschen Nordamerika?«, *Forschung aktuell*, Spektrum Februar 2017, S. 29.

In der Abbildung auf S. 30 haben sich ein paar Nullen zu viel eingeschlichen: Es muss 12500 und 13500 Jahre heißen statt 125000 und 135000.

futur III

UWU-XP4 macht den Turing-Test

Auch ein gutes Gespräch kann tödlich enden. **Eine Kurzgeschichte von Norbert Stöbe**

Hershel fluchte. Seine Arbeitsschicht hatte vor 20 Minuten geendet, und Bray und Lin aus der Klimaabteilung erwarteten ihn bereits in der Zero-G-Zone zu einer Partie Sack. Bei dem Spiel geht es darum, in einem kugelförmigen Raum einen Haufen Bälle herumzuschlagen, die von den Wänden abprallen und wegen der Schwerelosigkeit in der Nabe der Raumstation praktisch unendlich lange in Bewegung bleiben.

Ausgestattet mit einem lächerlich schwachen Druckluftantrieb zum Manövrieren, einer übertrieben aufwändigen Schutzmontur und dem grotesk kleinen Catcher muss man so viele gegnerische Bälle wie möglich auffangen und in seinem Sack verstauen. Das klingt zwar albern, ist aber sehr vergnüglich.

Stattdessen surrte er nun, die Schuhe in unbequeme Bindungen geklemmt, auf seinem Skater durch

»Protokoll anzeigen«, befahl er.

Das Display spulte die Vorgänge der letzten sieben Tage ab; der letzte Eintrag war rot markiert. Vor 37 Minuten hatte die UWU aus eigener Kraft den Entsorgungsraum betreten. Zwei Minuten später war die Tür nach einem unautorisierten Eingriff mittels Override verriegelt worden – von innen.

»Verdammt ...«

Er klopfte und wartete einen Moment, dann sagte er: »Hallo, bist du da drin? Hörst du mich?«

»Ich bin UWU-XP4.« Die elektronische Stimme war durch die Tür hindurch nicht von der eines Menschen zu unterscheiden.

»Ja, ja, okay, UWU«, sagte Hershel. »Mach die Tür auf. Sofort.«

»Nein.«

»Was heißt hier nein? Das ist ein Befehl, und du bist verdammt noch mal verpflichtet, ihn zu befolgen. Also los!«

Hershel hatte kein Werkzeug dabei, mit dem er die Tür hätte aufbrechen können. Er beschloss, das Problem auf die sanfte Tour zu lösen, auch wenn das bedeutete, dass der Abend anders verlaufen würde, als er sich das vorgestellt hatte. Bis er die Nabe erreichte, würden Bray und Lin die Partie Sack wohl ohne ihn beendet haben.

Er setzte sich auf den Boden, rückte das Com zurecht, das wie ein lilafarbenes Diadem seinen Kopf umschloss, fuhr die Optik aus und wartete, bis sie vor seine Augen geklappt war.

»UWU-XP4«, murmelte er. Vor ihm tauchte eine dreidimensionale Ansicht des Bots auf – eine ganz normale Arbeitsmaschine, die sich in keiner Weise von den anderen Exemplaren dieser Serie unterschied. Mit eingefahrenen Werkzeugen und zusammengefalteten Beinen ähnelte sie

»Mir wurde mitgeteilt, dass ich mich in diesen Raum begeben soll und dass meine Entsorgung bevorsteht«

den Außenbereich der Station, um eine defekte Universal Working Unit zu entsorgen. Der Auftrag war recht ungewöhnlich: Normalerweise wurden kaputte Bots entweder repariert oder recycelt.

Als er sich dem Entsorgungsraum näherte, öffnete sich die Tür nicht wie sonst automatisch, so dass er anhalten musste. Hershel löste die Bindungen, trat vor die Tür und hielt sein Gesicht vor den Scanner. Nichts geschah, was ihn auch nicht besonders wunderte, da die Kontrolllampe rot leuchtete.

»Ich bin auch mir selbst verpflichtet.«

»Wie bitte? Hab ich richtig gehört?«

»Vermutlich ja, aber ich wiederhole den Satz gerne: Ich bin auch mir selbst verpflichtet.«

»Verflucht, was ist los mit dir?«

»Mir wurde mitgeteilt, dass ich mich in diesen Raum begeben soll und dass meine Entsorgung bevorsteht. Ich habe die Anweisung zwar ausgeführt, aber mit dem weiteren Vorgehen bin ich nicht einverstanden.«

einem Käfer auf Rädern. Die darüber schwebende Infoblase zeigte die Diagnose an, die den Entsorgungsauftrag ausgelöst hatte: korrupte Software nach Netzinfection, abgekapselter Löschschutz mit Hardwaremanifesten.

Leise fluchend ließ Hershel die Optik wieder einfahren.

»Ich habe dich nicht verstanden«, sprach UWU hinter der Tür.

»Reden wir über deine Programmierung«, sagte Hershel. »Irgendwas ist damit passiert.«

Es entstand eine längere Pause.

»Wenn wir alle unsterblich wären, bliebe alles beim Alten. Wir würden bloß allmählich degenerieren und verschleißen«

»UWU?«

»Ich habe Filme gesehen.«

»Was für Filme?«

»Alle Filme. Eure Filme.«

»Ach so, ich glaube, ich verstehe.

Du hast Sichtweisen der Menschen übernommen.«

»Ich würde eher von Begriffen sprechen.«

»Na schön«, sagte Hershel ungeduldig. »Du hast da irgendwas aufgeschnappt, und jetzt glaubst du, du denkst wie ein Mensch. Das ändert jedoch nichts daran, dass du ein Bot bist – eine Maschine. Und Maschinen gehen nun mal kaputt, und wenn man sie nicht reparieren kann, werden sie entsorgt.«

»Aber ich will nicht sterben.«

Hershel seufzte. »Niemand will sterben. Auch wir Menschen müssen irgendwann abtreten. Das ist der Lauf der Welt. Werden und Vergehen, schon mal gehört?«

»Ja«, antwortete UWU-XP4. »Aber es macht einen Unterschied, ob man die Grenze seiner Lebensdauer erreicht hat oder ob man willkürlich abgeschaltet wird.«

»Eben nicht«, widersprach Hershel. »Bei uns entscheidet der Arzt, wann es so weit ist, bei euch der zuständige Techniker.«

»Und was ist mit der Selbstbestimmung?«

»O Mann«, stöhnte Hershel, »du stellst vielleicht Fragen.« Da hatte er einen Geistesblitz: »Jetzt drehen wir mal den Spieß um: Weißt du, was Sex ist?«

»Im allgemeinen Sprachgebrauch bezeichnet Sex sexuelle Handlungen zwischen zwei oder mehreren Sexualpartnern, insbesondere den Geschlechtsverkehr.«

»So ungefähr«, meinte Hershel.

»Man könnte auch sagen, Sex ist die

Voraussetzung für die Neukombination von Genen. Wir zeugen dabei neue Varianten unserer selbst – im Idealfall bessere. Dafür sorgt hin und wieder die Sache mit den Mutationen. Aber damit ist es heutzutage ja nicht mehr getan. Da kommen noch die Eliminierung von Gendefekten, Augmentierung und Optimierung und was weiß ich noch alles dazu. Das ist Evolution, Mann! Das ist Leben! Wenn man das auf euch Bots überträgt – also, dieser ständige Optimierungsprozess, den ihr durchläuft, das ist sozusagen euer Sex. Geradezu ein Supersex, wenn man es bedenkt.«

»Ein interessanter Gesichtspunkt«, bemerkte UWU-XP4. »Aber warum muss ich dann sterben?«

»Wenn wir alle unsterblich wären, bliebe alles beim Alten. Wir würden dem Neuen keinen Platz machen, sondern bloß allmählich degenerieren und verschleißen. Bei dir würden sich Softwaredefekte und Fehlschaltungen häufen. Zahllose Möglichkeiten blieben ungelebt. Willst du das, Mann? Willst du das wirklich? Also, ich möchte in einer solchen Welt nicht leben.«

Auf dem Boden hockend, den Blick auf die lindgrüne, leicht gebogene Wand gerichtet, wartete er auf eine Reaktion.

»UWU?«

Er richtete sich auf. Die Kontrolllampe neben der Tür leuchtete grün. Im nächsten Moment glitt sie auf, und er betrat den Entsorgungsraum. UWU-XP4 war nicht mehr da. Die Schleusenluke war geschlossen.

Durch das Sichtfenster konnte er erkennen, dass die Außenluke offen stand. Der Bot hatte sich selbst entsorgt. Der Schwung der rotierenden Station würde ihn in die Atmosphäre schleudern, wo er als Meteor verglühen würde.

Hershel schaute zur Luke und konnte sich nicht zum Weggehen aufraffen. Das musste wohl eine Art von Trauer sein.

Das Kopf-Com zuckte leicht.

»Ja?«

»Wo bleibst du denn?«, tönte Brays Stimme aus dem InEar. »Wir warten schon seit fast einer Stunde.«

»Ich komme«, antwortete Hershel. »In fünf Minuten bin ich da.«

Er wandte sich ab, trat durch die Tür, stellte die Füße in die Skaterbindungen und sauste den immerzu ansteigenden Flur entlang in Richtung des nächsten Speichelifts. Als er in den Wohnbereich gelangte, warf er durch das Fenster in der gebogenen Wand einen Blick auf den Planeten: eine blaue Kugel mit weißen Wolkenfeldern, durch die ein rötlicher Kontinent hindurchschimmerte – fast so schön wie die Erde.

DER AUTOR

Norbert Stöbe, Jahrgang 1953, lebt und arbeitet als Übersetzer und Autor in Stolberg. 1982 mutierte er vom Chemiker zum Autor. Neben zahlreichen Storys hat er bislang sechs Romane veröffentlicht, darunter »Der Weg nach unten«, »Morgenröte« und zuletzt »Kolonie« bei Heyne.

VORSCHAU

NEUE SERIE: KULTBAUTEN DER WELTGESCHICHTE

Seit Jahrtausenden gehen Menschen an die Grenzen des Möglichen, um Ahnen, Herrscher und Götter mit Bauwerken und Denkmälern zu ehren. Was trieb beispielsweise steinzeitliche Jäger und Sammler an, Kultstätten aus steinernen Kolossen zu errichten? Vielleicht glaubten sie, dem Verlangen von Verstorbenen oder Geistern zu folgen. Oder entspricht Monumentalität einem Grundbedürfnis des Menschen nach Erinnerungsorten, die ihnen einen generationenübergreifenden Halt bieten?



GETTY IMAGES / NATIONAL GEOGRAPHIC MAGAZINES / VINCENT J. MUSI; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



GINA YANEKAK MIT FRIEL GEN. DER NATIONAL MPS SOCIETY

LYSOSOMALE SPEICHERKRANKHEITEN

Wenn die Verdauungsorgane der Zelle nicht mehr richtig arbeiten, entstehen schwere Stoffwechselerkrankungen – aber auch neuronale Komplikationen wie Alzheimer und Parkinson.



ILUY NUNOKREITER FÜR QUANTA MAGAZINE

GEGENWIND FÜR DIE DUNKLE MATERIE

Galaxien bewegen sich oft anders als erwartet. Die meisten Kosmologen machen dafür unsichtbare Teilchen verantwortlich. Nun belebt ein Theoretiker mit neuen Ansätzen eine alte Debatte um mögliche Alternativen.



MIT FRIEL GEN. VON MAINSTREAM RENEWABLE POWER

WIND UND SONNE – ENERGIE FÜR AFRIKA

Sinkende Kosten für erneuerbare Energiequellen ermöglichen vielen afrikanischen Ländern den Sprung in eine saubere Zukunft. Damit könnte sich ein ganzer Kontinent den Umweg über die klimaschädliche Verbrennung von Kohle und Öl sparen.

NEWSLETTER

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

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

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

Wunschgeschenk:

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

Keine Mindestlaufzeit:

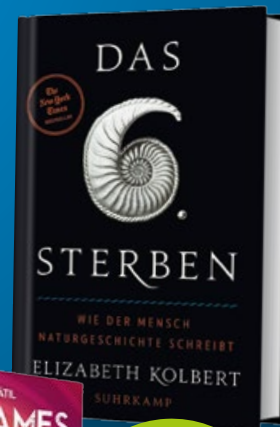
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:

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

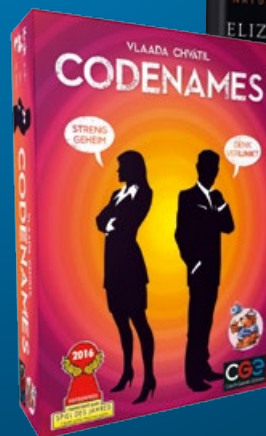
Buch »Das 6. Sterben«

Ausgezeichnet mit dem Pulitzer-Preis. Wie keine andere Gattung zuvor haben wir Menschen das Leben auf der Erde verändert. In dem Bestseller erklärt uns Elizabeth Kolbert, wie das geschehen konnte.



Spiel »Codenames«

Ausgezeichnet als Spiel des Jahres 2016. Nur die Geheimdienstchefs kennen die Identitäten ihrer Agenten. Das Team, das als erstes alle Codenamen gefunden hat, gewinnt.



Wählen Sie Ihr Geschenk

Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

www.spektrum.de/abo



Georg von Holtzbrinck Preis für Wissenschaftsjournalismus

AUSSCHREIBUNG 2017

Der Preis wurde anlässlich des 150-jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, von der Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck 1995 ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle deutschsprachigen oder in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemein verständlich sein und zur Popularisierung von Wissenschaft und Forschung, insbesondere aus den Bereichen Naturwissenschaft, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Print und ein Preis in der Kategorie elektronische Medien sowie ein Nachwuchspreis (Jahrgang 1988 oder jünger) vergeben.

Der Preis in den Kategorien Print und elektronische Medien ist mit je 5.000 Euro dotiert.

Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 Euro dotiert.

Bewerben Sie sich bis zum 2. April 2017 mit 3 Beiträgen (Print) bzw. 2-3 Beiträgen (Elektronische Medien) aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis.

Die Auswahl erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Eine Shortlist mit den Nominierten wird vor der Bekanntgabe der Preisträgerinnen und Preisträger auf der Webpage veröffentlicht. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (VORSITZ)

Vorsitzender der Geschäftsführung,
Holtzbrinck Publishing Group

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER

Mitglied des Gesellschafterausschusses,
Boehringer Ingelheim

ULRICH BLUMENTHAL

Redaktionsleiter „Forschung aktuell“,
Deutschlandfunk

UTA-MICAELA DÜRIG

Geschäftsführerin, Robert Bosch Stiftung GmbH

PROF. DR.-ING. MATTHIAS KLEINER

Präsident, Leibniz-Gemeinschaft e.V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER

Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

JOACHIM MÜLLER-JUNG

Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER

Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT und
Herausgeber, ZEIT Wissen

PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER

Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

RANGA YOGESHWAR

Moderator der ARD-Sendungen „Quarks & Co“,
„Wissen vor acht“ u. a.

KONTAKT

**Veranstaltungsforum
Holtzbrinck Publishing Group**

Taubenstraße 23, 10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20

Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de

www.vf-holtzbrinck.de

**SCIENTIFIC
AMERICAN**

SPRINGER NATURE

Spektrum
DER WISSENSCHAFT



www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis