

# Spektrum

der Wissenschaft

## Galaktische Kollisionen

und die Zukunft unserer Milchstraße

8,90 € (D/A/L) · 14,- sFr. · D6179E  
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



**MEDIZIN** Aufstieg der RNA-Impfstoffe

**ENERGIE** Wettrennen zur Kernfusion

**ANTHROPOLOGIE** Verwendeten die Neandertaler Zahlen?



# Georg von Holtzbrinck Preis für Wissenschaftsjournalismus

## AUSSCHREIBUNG 2022

### JETZT BEWERBEN

bis zum 4. April 2022

Der Georg von Holtzbrinck Preis zeichnet herausragende Beiträge auf dem Gebiet des Wissenschaftsjournalismus aus. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Der Preis wurde 1995 von der Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck anlässlich des 150-jährigen Bestehens der Zeitschrift „Scientific American“, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, ins Leben gerufen.

Es wird ein Preis in der **Kategorie Text**, ein Preis in der **Kategorie Elektronische Medien** und ein Preis in der **Kategorie Nachwuchs** vergeben.

Die Preise in den Kategorien Text und Elektronische Medien sind mit jeweils 10.000 EUR dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 5.000 EUR dotiert.

Detaillierte Informationen unter  
[www.holtzbrinck-wisspreis.de](http://www.holtzbrinck-wisspreis.de)



# EDITORIAL EWIGE FEUER

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur  
lingenhoehl@spektrum.de

► Haben Sie schon einmal von untoten Feuern gehört? Das sind Brände, die vermeintlich gelöscht sind, aber unter der Oberfläche weiterschwelen, bevor sie unter günstigen Bedingungen wieder ausbrechen und erneut riesige Flächen verzehren können. Sie breiten sich mittlerweile zunehmend in den arktischen und subarktischen Gefilden unserer Erde aus.

Ab S. 50 schildern Randi Jandt und Alision York, wie diese Zombiefuer Alaska verändern und Teil einer gefährlichen Kaskade sind: Der Klimawandel erwärmt die Region und trocknet die Torfschichten aus, so dass diese leichter brennen. Die Winter werden kürzer und schneeärmer, was die Glutnester im Untergrund zu wenig eindämmt und neuerliche Feuer im folgenden Frühling erleichtert. Gleichzeitig zerstören die Brände den Permafrost; Böden sacken ab, und Treibhausgase gelangen verstärkt in die Atmosphäre, die wiederum die Erderwärmung antreiben.

Einige Wissenschaftler meinen sogar, dass wir uns im Pyrozän befinden, dem Zeitalter des Feuers: Wegen uns Menschen brenne es häufiger, intensiver und auch in Ökosystemen, die von Natur aus eigentlich nicht gefährdet sind, wie tropische Regenwälder oder nordische Moore. Tatsächlich ist die Lage etwas komplexer. Die Gesamtzahl der Wald- oder Buschbrände ist in den letzten Jahrzehnten weltweit zurückgegangen, weil Steppen oder Savannen in Ackerflächen umgewandelt wurden und sich Feuer dank moderner Technik effektiver bekämpfen lassen.

Auf der anderen Seite vernichten Buschbrände heute riesige Flächen nahezu ungebremst, wenn sie außer Kontrolle geraten, weil der Mensch das natürliche Feuerregime zerstört hat. Das vermehrt angesammelte Material lässt sie heißer und intensiver brennen. Die katastrophalen Folgen konnten wir 2019/20 etwa in Australien, Kalifornien oder Südamerika sehen, wo Millionen Hektar Wald in wenigen Wochen zerstört wurden. Selbst Feuchtgebiete wie das Pantanal sind inzwischen nicht mehr sicher, weil außergewöhnliche Dürren sie austrocknen, während gleichzeitig Menschen mit dem Zündholz roden wollen.

In Alaska hofft man nun darauf, dass sich die Natur selbst hilft, etwa indem sich durch den Klimawandel weniger feueranfällige Laub- statt der Nadelbäume ansiedeln. Noch ist das aber eine riskante Rechnung mit zu vielen Unbekannten.

Abwartend grüßt



## NEU AM KIOSK!

Spektrum SPEZIAL Biologie – Medizin – Hirnforschung 1.22 liefert umfassende Hintergründe und Informationen zu einem Thema, das nun schon seit zwei Jahren im Zentrum unserer Aufmerksamkeit steht.

## IN DIESER AUSGABE



### AARON S. EVANS, LEE ARMUS

Die dramatischen Vorgänge bei Galaxienkollisionen spielen sich oft im Verborgenen ab. Die US-Astronomen berichten ab S. 12 von ihrem Versuch, den Phänomenen nachzuspüren.



### JASON ULRICH, DAVID M. HOLTZMAN

Die beiden US-amerikanischen Neurologen stellen ab S. 44 einen bisher vernachlässigten, aber wichtigen Aspekt der Alzheimerkrankheit vor.



### RANDI JANDT, ALISON YORK

Seit vielen Jahren untersuchen die beiden Feuerökologinnen Brände in der Arktis. Warum manch erloschen geglaubtes Feuer nach dem Winter wieder aufflammt, schreiben sie ab S. 50.

# INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

20 FORSCHUNG AKTUELL

**Der Energiezufuhr beraubt**  
Krebszellen stehlen Immunzellen die Mitochondrien.

**Mysteriöse Neutrinos**  
Modelle sind fehleranfälliger als gedacht.

**Den Zufall bezwingen**  
Hochdimensionale Graphen helfen beim Codieren.

27 SPRINGERS EINWÜRFE

**Freundliche Maschinen**  
Die Akzeptanz ungewohnter Technik braucht Vorarbeit.

58 ZEITREISE

59 FREISTETTERS FORMELWELT

**Die Mathematik der Ungleichheit**  
Eine Lösung ist leider nicht in Sicht.

72 SCHLICHTING!

**Fingerschnippen mit Knalleffekt**  
Der Daumen ermöglicht erstaunlich laute Töne.

92 REZENSIONEN

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

12 KOSMOLOGIE **WENN GALAXIEN KOLLIDIEREN**

Zusammenstöße von Gas und Staub im All haben dramatische Folgen.  
Von Aaron S. Evans und Lee Armus

28 MEDIZIN **DER VERSCHLUNGENE WEG ZUM RNA-IMPfstOFF**

Die Geschichte der RNA-Vakzine illustriert eindrücklich, wie hürdenreich Forschung ist – und wie sehr sie auf Teamarbeit beruht.  
Von Elie Dolgin

38 AUTOIMMUNKRANKHEITEN **RISIKOFAKTOR: WEIBLICH**

**Serie: Der Feind im eigenen Körper (Teil 2)** Mehr als drei Viertel der von Autoimmunerkrankungen Betroffenen sind Frauen. Woran liegt das?  
Von Melinda Wenner Moyer

44 DEMENZ **VOM HELFER ZUM VERRÄTER**

Spezielle Immunzellen im Gehirn, die Mikroglia, spielen eine wichtige Rolle bei der Entstehung der Alzheimerkrankheit. Das liefert neue Ansatzpunkte für die Therapie.  
Von Jason Ulrich und David M. Holtzman

50 TORFBRÄNDE **ZOMBIEFEUER AUF DEM VORMARSCH**

Im hohen Norden können vermeintlich erloschene Brände nach Monaten wieder zum Leben erwachen. Heiße, trockene Sommer und eine Besonderheit des arktischen Bodens begünstigen das Phänomen.  
Von Randi Jandt und Alison York

60 ENERGIETECHNIK

**WETTlauf ZUM ERSTEN FUSIONSREAKTOR**

Milliardeninvestitionen sollen die Kernfusion kommerziell nutzbar machen. Der Optimismus in der Branche ist groß, die Herausforderungen sind das allerdings ebenfalls.  
Von Philip Ball

74 GEOMETRIE **MATHEMATIK MIT FLIESEN UND BAUKLÖTZEN**

Welche Möglichkeiten gibt es, einen Raum zu kacheln? An diese Frage angelehnt, blieb eine Vermutung 90 Jahre lang unbeantwortet – bis sich ein Computer ihrer annahm.  
Von Kevin Hartnett

80 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **ECKIGE WELLEN**

In der Natur können sich schwingende Medien zu rationalen Zeitpunkten völlig anders verhalten als zu irrationalen.  
Von Christoph Pöppe

86 ARCHÄOLOGIE **DER URSPRUNG DES ZÄHLENS**

Faszinierende Funde lassen vermuten: Schon die Neandertaler rechneten mit Zahlen und legten sich dafür »Merkzetteln« in Form von Knochen an.  
Von Colin Barras

TITELBILD:  
ESA/HUBBLE & NASA (ESA/HUBBLE.ORG/IMAGES/  
POTW1345A1/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.  
ORG/LICENSES/4.0/LEGALCODE);  
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



12

TITELTHEMA  
WENN GALAXIEN KOLLIDIEREN

ROM MILLER / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2021



LEON DE DRUIT / GETTY IMAGES / ISTOCK  
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

28

MEDIZIN  
DER VERSCHLUNGENE WEG  
ZUM RNA-IMPfstoff

ALAMY / DESIGN PICS INC. / DARVYL PEDERSON



50

TORFBRÄNDE  
ZOMBIEFEUER AUF DEM VORMARSCH



ALAMY / PICTURE ALLIANCE / DPA / STEFAN SAUER

60

ENERGIETECHNIK  
WETTLAUF ZUM  
ERSTEN FUSIONSREAKTOR



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

74

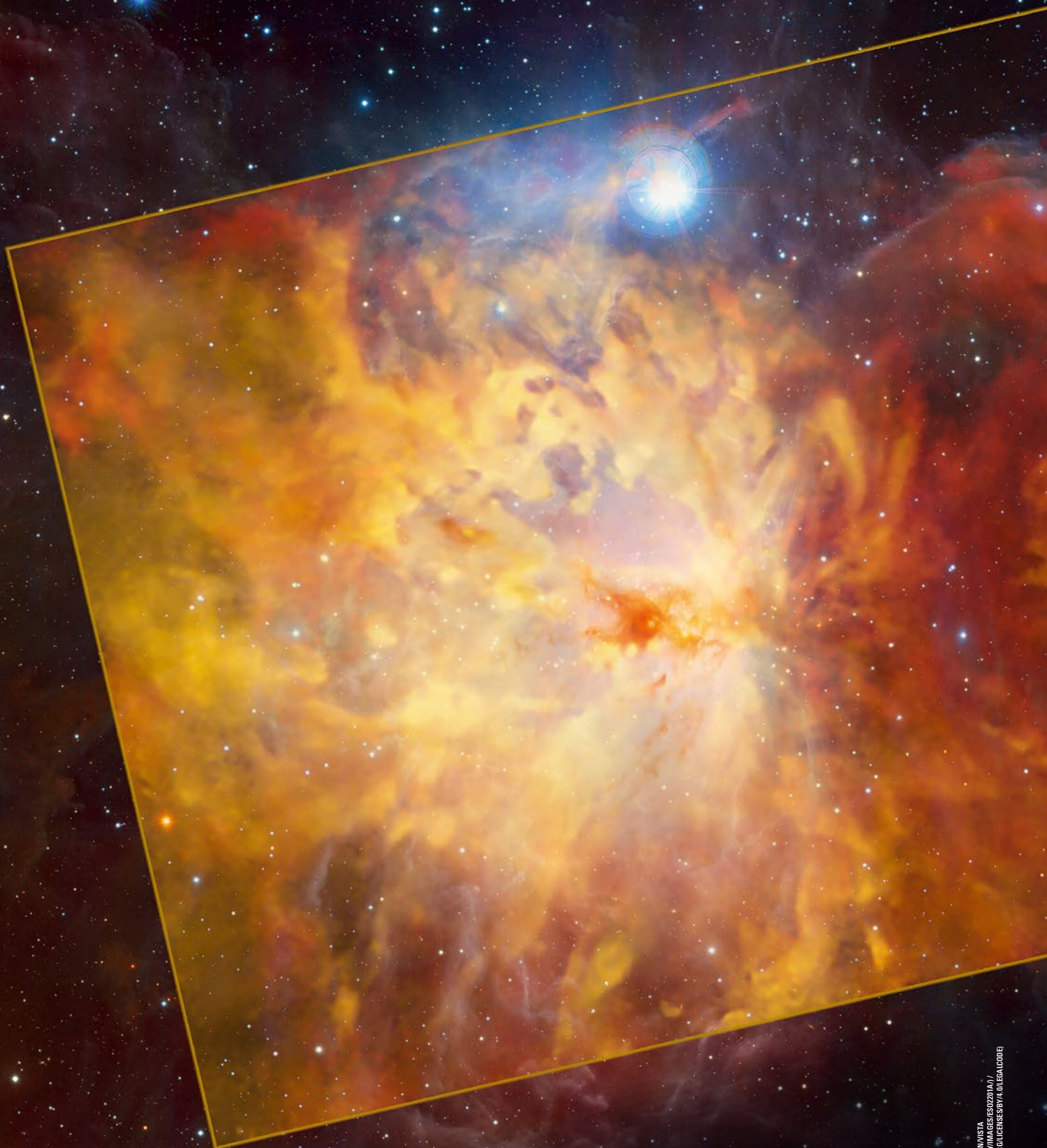
GEOMETRIE  
MATHEMATIK MIT  
FLIESEN UND BAUKLÖTZEN



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

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

# SPEKTROGRAMM





## EIN NEBEL WIE IN FLAMMEN

► Im Sternbild Orion scheint es zu lodern – aber die Gaswolken dort brennen ganz sicher nicht. Das Bild im schräg stehenden Rechteck zeigt den etwa 1500 Lichtjahre entfernten Flam-

mennebel und rechts daneben den Reflexions- und Emissionsnebel NGC 2023, von der Erde aus betrachtet eine der leuchtstärksten Quellen angeregten molekularen Wasserstoffs. Astronominen und Astronomen der Europäischen Südsternwarte haben die Himmelsregion mit Hilfe des Radioteleskops APEX (Atacama Pathfinder Experiment) abgebildet. Die Farben zeigen, wie schnell sich das Gas bewegt. Als Ganzes entfernt sich die

Struktur von uns, wobei die rot eingefärbten Bereiche schneller zurückweichen als die gelben. Das dunkle Bild im Hintergrund ist ein Infrarotfoto desselben Gebiets, das die dortigen Objekte in anderen Farben darstellt als die APEX-Abbildung.

Im Flammennebel und seiner Umgebung entstehen zahlreiche neue Sterne und Planeten. In kosmischen Maßstäben betrachtet handelt es sich um eine stellare Kinderstube in unserer unmittelbaren Nachbarschaft.

*Astronomy & Astrophysics 10.1051/  
0004-6361/201937034, 2022*

## PALÄO BIOLOGIE KOLOSS AUS DEM KARBON

► Forscher haben die Überreste des größten bislang bekannten Gliederfüßers entdeckt. Es handelt sich um das fossile Segment eines Lebewesens, das einem gigantischen Tausendfüßer ähnelte. Das Tier aus der Gattung *Arthropleura* dürfte bis zu 2,7 Meter lang und 50 Kilogramm schwer gewesen sein, berichten der Geologe Neil Davies von der University of Cambridge und sein Team. Hinsichtlich der Körpermaße übertrifft es selbst die prähistorischen Seeskorpione, die bislang die größten bekannten Gliederfüßer darstellten. Zu Tage kam die Versteinerung im Jahr 2018, als

ein Sandsteinfelsen von einer Klippe in der englischen Grafschaft Northumberland abbrach und auf den Strand stürzte. Er zerbrach so perfekt, dass er das Fossil unzerstört frei gab. Einer der beteiligten Forscher fand es bei einem Spaziergang. Vier Menschen waren nötig, um es für die Untersuchung abzutransportieren.

Im Labor identifizierten Davies und seine Gruppe es als Überreste eines Gliederfüßers, der vor 326 Millionen Jahren lebte, also im Karbon. Zu jener Zeit lag das Gebiet in Äquatornähe. Viele der damaligen Wirbellosen und frühen Amphibien hielten sich in Gewässernähe auf, fraßen Pflanzen oder gingen auf die Jagd. Auch das jetzt gefundene *Arthropleura*-Segment endete einst in einem Flussarm,

wo es unter Sedimenten verschwand und später fossilisierte. Die Forscher nehmen an, dass der zugehörige Gliederfüßer zu dem Zeitpunkt nicht gestorben war, sondern sich gehäutet hatte und sein Exoskelett versteinerte.

Bislang kennt man nur zwei weitere *Arthropleura*-Fossilien. Beide sind in Deutschland aufgetaucht und deutlich kleiner. Der neue Fund wirft die Frage auf, wie die Tiere so groß werden konnten. Nach gängigen Annahmen existierten die gewaltigsten Wirbellosen zu jener Zeit, als der atmosphärische Sauerstoffgehalt am höchsten war. Doch der *Arthropleura*-Gigant lebte vorher. Zudem benötigte er wohl eine sehr gehaltvolle Nahrung. Vermutlich fraß er Pflanzenmaterial, vielleicht jagte er auch.

Die Gattung *Arthropleura* existierte rund 40 Millionen Jahre lang, bevor sie aus unbekanntem Gründen im Perm ausstarb. Möglicherweise fiel sie einem Klimawandel zum Opfer oder musste den neu aufkommenden Reptilien weichen. Ihre Verwandten, die Tausendfüßer, haben bis heute überlebt.

*Journal of the Geological Society* 10.1144/jgs2021-115, 2021



NEIL DAVIES, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

**URZEITRIESE** Das neu entdeckte *Arthropleura*-Exemplar (unten: Fossil, oben: Rekonstruktion).



NEIL DAVIES, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE



## MEDIZIN PATIENT ERHÄLT SCHWEINEHERZ

Ein Ärzteteam in den USA hat nach eigenen Angaben erstmals einem menschlichen Patienten ein gentechnisch verändertes Schweineherz eingesetzt. Das Organ wurde am 7. Januar 2022 einem 57-Jährigen mit lebensgefährlichem Herzleiden in einer Klinik in Baltimore (Maryland) transplantiert, wie das Krankenhaus mitteilte. Die Operation dauerte US-Medien zufolge acht Stunden, das eingesetzte Herz habe die Arbeit aufgenommen, dem Patienten gehe es gut.

Zuvor hatten Forscherinnen und Forscher bei dem Spenderschwein drei Gene ausgeschaltet, die normalerweise für eine schnelle Abwehrreaktion des menschlichen Organismus gegen fremde Körperbestandteile sorgen. Eine weitere Erbanlage legten sie lahm, um das Wachstum des Herzgewebes einzudämmen. Weiterhin fügten sie sechs menschliche Gene hinzu, die es dem Immunsystem



PIONIERTAT Ärzte haben einem Totkranken ein Schweineherz eingesetzt.

UNIVERSITY OF MARYLAND MEDICAL CENTER (UMMC)

erleichtern sollen, das eingepflanzte Organ zu akzeptieren.

Für den Patienten sei das Schweineherz die einzige Option gewesen, da er für die Transplantation eines menschlichen Herzens nicht geeignet gewesen sei, heißt es aus der Klinik. Er stand folglich vor der Wahl, sich entweder dem Experiment zu unterziehen oder zu sterben. Die US-Arzneimittelbehörde FDA erteilte eine Notfallgenehmigung für den Eingriff. Das ist möglich, wenn der Betroffene keine andere Chance mehr auf Rettung hat.

In den USA sind – wie anderswo auch – nicht genügend Spenderorgane verfügbar, um jedem, der eins braucht,

helfen zu können. Jedes Jahr sterben dort mehr als 6000 Patienten, während sie auf ein Organ warten. In Deutschland befinden sich derzeit mehr als 9000 Menschen auf einer entsprechenden Warteliste; dem gegenüber standen im Jahr 2020 bundesweit nur 913 Organspenderinnen und -spender.

Ob genmodifizierte Tierorgane den Ausweg aus diesem Dilemma weisen, bleibt abzuwarten. Auch bei dem Patienten aus Maryland wird erst die Zeit zeigen, ob sein Organismus sich langfristig mit dem Schweineherz arrangiert.

*dpa / Pressemitteilung der University of Maryland vom 10. Januar 2022*

## PHYSIK DEN DREIFACHEN LEIDENFROST GETANZT

Der »Leidenfrost-Effekt« sorgt dafür, dass Flüssigkeitstropfen auf heißen Oberflächen umherrszen: Die Unterseite des Tropfens verdampft, was ihn auf einem reibungsarmen Gaskissen schweben lässt. Dazu muss die Temperatur des Untergrunds deutlich über der Siedetemperatur der Flüssigkeit liegen. Ein Team um Felipe Pacheco-Vázquez von der Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (Mexiko) beschreibt nun einen dreifachen Leidenfrost-Effekt. Der tritt auf, sobald Tropfen verschiedener Flüssigkeiten herumflitzen und in Kontakt kommen. Stoßen etwa Ethanol- und Wassertropfen auf einer 250 Grad Celsius warmen Heizplatte zusammen, mischen sie sich nicht, sondern prallen voneinander ab, wie die Forscher melden. Und das, obwohl sich Alkohol üblicherweise gut in Wasser löst.

Verantwortlich sind die unterschiedlichen Siedetemperaturen der Flüssigkeiten. Bei einer Kollision zweier Tropfen trifft eine wärmere Oberfläche (Wasser) auf eine kühlere (Ethanol). Das wirkt sich genauso aus wie der Kontakt zum heißen Untergrund: Es entsteht eine reibungsarme Gasschicht an der Grenze. Die Berührungen beider Flüssigkeiten untereinander sowie jeweils mit der Heizplatte ergeben somit einen dreifachen Leidenfrost-Effekt.

Freilich dauert die wilde Fahrt nicht ewig. Sobald die schneller verdampfende Flüssigkeit nur noch aus sehr kleinen Tröpfchen besteht, deren Abmessungen der so genannten Kapillarlänge nahekommen (einem Faktor, der Schwerkraft und Oberflächenspannung in Beziehung setzt), vermischt sie sich doch mit der lang-

samer verdampfenden. Polare Substanzen wie Ethanol und Wasser vereinen sich nun problemlos. Ein polarer und ein unpolare Stoff dagegen bilden Emulsionen, die – je nach Temperatur – ein Multiphasensystem aus gasförmigen und flüssigen Bestandteilen darstellen. Ist eine der beteiligten Substanzen sehr flüchtig, kann es die Emulsion explosiv auseinanderreißen, berichten die Wissenschaftler.

Derlei Forschung soll helfen, Vorgänge beim Erhitzen und Mischen von Substanzen besser zu verstehen, die bei diversen chemischen Reaktionen eine Rolle spielen. Beispielsweise ist noch nicht völlig geklärt, warum der Leidenfrost-Effekt manche Reaktionen beschleunigt.

*Physical Review Letters 10.1103/PhysRevLett.127.204501, 2021*

## ARCHÄOLOGIE PHARAO-MUMIE UNTER DER LUPE

Die Mumie von Pharao Amenophis I. (Regierungszeit 1525–1504 v. Chr.) ist seit rund 3000 Jahren nicht aus den Leinenbinden gewickelt worden und damit wohl eine Ausnahme unter den ägyptischen Königsmumien. Gleichwohl wurde sie einst von Grabräubern geplündert – und anschließend wieder zusammengeflickt. Sahar Saleem von der Universität Kairo und der ehemalige ägyptische Antikenminister Zahi Hawass haben den Leichnam jetzt per Computertomografie durchleuchtet und dabei einige bereits im Altertum restaurierte Schäden entdeckt.

Wie die CT-Scans zeigten, starb der Pharao im Alter von etwa 35 Jahren ohne erkennbare Erkrankungen. Er war 1,69 Meter groß und beschnitten. Die Todesursache ließ sich nicht ermitteln.

Die Einbalsamierer hatten weder Herz noch Gehirn entfernt, aber die Eingeweide entnommen und die Bauchhöhle danach mit Leinen ausgestopft. Auf und im Körper sowie zwischen den Leinenbinden entdeckten die Forscher 30 Amulette, die den Leichnam magisch schützen sollten. Um die Taille liegt ein Gürtel aus Goldperlen.

Die Mumie weist mehrere Defekte auf, die noch im Altertum behoben worden sind. So war der Kopf abgetrennt und mit einer harzgetränkten Binde wieder befestigt worden. Der linke Arm ist abgebrochen; spätere Restauratoren haben ihn neben den Oberkörper gelegt und mit Binden fixiert. Aus der noch weitgehend originalen Lage der rechten Extremität schließen die Forscher, dass die Arme einst über Kreuz auf dem Oberkörper lagen. Der rechte Fuß ist ebenfalls beschädigt worden; jemand hat ihn mit einem Holzbrett gestützt, beides umwickelt und das Brett mit den Bandagen vernagelt.



SAHAR N. SALEEM / ZAHY HAWASS. PRESIDENT OF THE SAHARA IN HAWASS. 7. DIGITAL UNWRAPPING OF THE MUMMY OF KING AMENHOTEP I (1525–1504 BC) USING CT. FRONTIERS IN MEDICINE 8, 2021, FIG. 2

### DURCHLEUCHTET CT-Untersuchungen machen den Schädel im Inneren der Mumienmaske sichtbar.

Grabräuber hatten noch in altägyptischer Zeit die Ruhestätten im Tal der Könige beraubt. Dabei rissen sie die einbalsamierten Körper auf der Suche nach Amuletten auseinander. Wie Inschriften auf den Särgen verraten, ließen Priester im 11. Jahrhundert v. Chr. die Königsmumien einsammeln, restaurieren und in ein Grab der nahe gelegenen Nekropole Deir el-Bahari umbetten.

*Frontiers in Medicine 10.3389/fmed.2021.778498, 2021*

## EVOLUTION URAHN ALLER LEBEWESEN ERNÄHRTE SICH VON WASSERSTOFF

Alle heutigen Lebewesen stammen wahrscheinlich von einem gemeinsamen Vorfahren ab, der vor mindestens 3,5 Milliarden Jahren lebte. Dieser hypothetische Ahn namens LUCA (last universal common ancestor) war vermutlich ein zellähnliches Gebilde mit rudimentärem Stoffwechsel. Er kann noch nicht den komplexen Molekülapparat besessen haben, über den heutige Zellen verfügen – was die Frage aufwirft, ob die ersten zellulären Stoffwechselreaktionen spontan abliefen oder auf Energiezufuhr von außen angewiesen waren. Ein Team um Jessica Wimmer von der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf ist dem nachgegangen und kommt zum Schluss: LUCA bezog seine Energie maßgeblich aus Wasserstoff und betrieb damit einen selbstständigen Metabolismus, der keine externen Energiequellen benötigte.

Wimmer und ihre Kollegen identifizierten 402 biochemische Reaktionen,

die so etwas wie den Basisstoffwechsel heutiger Zellen darstellen. Sie funktionieren bei allen Mikroben weitgehend gleich und liefern Grundbestandteile der Zelle wie Aminosäuren, Nukleotide und Vitamine. Experimentelle Daten und theoretische Überlegungen deuten darauf hin, dass sich diese Reaktionen seit Beginn des Lebens nicht wesentlich verändert haben und bereits in LUCA stattgefunden haben könnten.

In Laborversuchen und Computersimulationen testete das Team für verschiedene Umweltbedingungen, welche Energiebilanz die Basisreaktionen haben. Dabei stellte sich heraus: Fast alle laufen freiwillig und Energie liefernd ab, wenn die Temperatur rund 90 Grad Celsius beträgt, der pH-Wert des umgebenden Wassers zwischen 7 und 10 liegt und bestimmte Ausgangsstoffe vorhanden sind – nämlich Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und

Phosphate. Solche Bedingungen sind in hydrothermalen Tiefseequellen erfüllt oder auch in wassergefüllten Spalten der Erdkruste. Diese Orte sehen Fachleute als mögliche Stätten der Entstehung des Lebens an.

»Bei genügend starker Hitze, hinreichend hohem pH-Wert und ausreichend Stoffnachschieb tendierte das System der Basis-Stoffwechselreaktionen dazu, sich selbst aufrechtzuerhalten, ohne dass Proteine oder Enzyme daran mitwirkten«, sagt Wimmer. LUCAs Metabolismus konnte sich demnach unter den richtigen Bedingungen spontan entfalten. Eine zusätzliche Energiezufuhr durch elektrische Entladungen, UV-Licht, Vulkanausbrüche oder Meteoriteneinschläge war nicht erforderlich. Angetrieben worden sei der Ur-Metabolismus letztlich von Wasserstoff, wie der Evolutionsbiologe William Martin betont, der das Team leitet.

*Frontiers in Microbiology 10.3389/fmicb.2021.793664, 2021*

## GEOWISSENSCHAFTEN

# VULKANISCHE HOTSPOTS SIND KÜHLER ALS GEDACHT

► Riesige Ansammlungen geschmolzenen Gesteins speisen isolierte Vulkane auf Hawaii, Island oder auch den Yellowstone-Supervulkan. Doch wie sich nun herausstellte, weisen sie oft überraschend niedrige Temperaturen auf. Das stellt eine 50 Jahre alte Hypothese über ihren Ursprung in Frage. Wie eine Arbeitsgruppe um Xiyuan Bao von der University of California in Los Angeles nach seismischen Messungen berichtete, ist ungefähr jeder zweite Hotspot nicht heiß genug, um mittels Auftrieb aus dem tiefen Erdmantel aufzusteigen. Damit ist unklar, ob sie tatsächlich von der Grenze zwischen Erdkern und Mantel ausgehen wie üblicherweise angenommen.

Ein Hotspot besteht aus einem Kanal, durch den Material aus großer Tiefe aufsteigt. Es bildet unter der Erdkruste eine pilzartige Blase, aus der

sich darüberliegende Vulkane speisen. Die Arbeitsgruppe um Bao hat die Geschwindigkeit seismischer Wellen im Mantel unterhalb des Hotspot-Materials gemessen und daraus die dortige Temperatur berechnet, aus der sich wiederum schließen lässt, wie heiß der Hotspot selbst ist. Um schnell genug aus großen Tiefen aufzusteigen, muss die Schmelze mindestens 100 bis 300 Grad Celsius heißer sein als die der Mittelozeanischen Rücken.

Das ist aber nur bei 45 Prozent der Hotspots der Fall – wenn überhaupt. Laut dem Team reicht die bisherige Theorie über den Ursprung von Hotspots deshalb nicht aus, um Vulkane jenseits der Plattengrenzen zu erklären. Womöglich speise sich ein Teil der Hotspots aus ganz anderen Quellen als gedacht.

Befunde zur Zusammensetzung des Heliums in den Hotspot-Vulkanen

sprechen ebenfalls dafür. Die heißeren dieser Gebilde haben im Schnitt einen höheren Helium-3-Anteil, was für seit Jahrmilliarden kaum verändertes Material aus großen Tiefen spricht. Die Heliumsignatur kühlerer Hotspots weicht davon ab und ist näher an jener der Mittelozeanischen Rücken. Eine mögliche Erklärung dafür lautet, dass nur die heißesten Hotspots ihren Ursprung an der Kern-Mantel-Grenze haben. Die anderen könnten in geringeren Tiefen durch lokale Konvektion entstehen.

Denkbar scheint nach Ansicht der Forscher ebenso, dass klassische Hotspots auf dem Weg nach oben manchmal »stecken bleiben« und abkühlen oder die vermeintlich kühlen unter ihnen klein sind und ihre Temperatur deswegen unterschätzt wird.

*Science 10.1126/science.abj8944, 2022*

## RAUMFAHRT

# ERSTMALS DIE SONNE BERÜHRT

► Die NASA-Raumsonde »Parker Solar Probe« ist durch die äußere Atmosphäre der Sonne geflogen und hat damit laut der Behörde als erstes Raumschiff unseren Mutterstern berührt. Die Passage habe wenige Stunden gedauert und bereits am 28. April 2021 stattgefunden. Die Raumsonde habe dabei Partikel und Magnetfelder untersucht. Erste Ergebnisse des Vorbeiflugs hat das Missionsteam in der Fachzeitschrift »Physical Review Letters« publiziert.

Parker Solar Probe umrundet unser Zentralgestirn auf elliptischen Bahnen und wird sich ihm in den kommenden Jahren weiter annähern. Bei ihrem bislang letzten dichtesten Vorbeiflug (»Perihel«) am 21. November 2021 befand sich die Raumsonde rund 8,5 Millionen Kilometer über unserem

Mutterstern. Allerdings besitzt dieser keine feste Oberfläche. Die Bestandteile seiner Atmosphäre werden von Schwerkraft und magnetischen Einflüssen festgehalten, von Hitze und Strahlung hingegen weggedrückt. Ab einer bestimmten Entfernung zum Sonnenmittelpunkt sind Gravitation und Magnetfelder nicht mehr stark genug, um das Entkommen des Materials zu verhindern – es wird zu Sonnenwind, der ins All entschwindet. Die Grenze, ab der das geschieht, heißt Alfvén-Oberfläche und markiert das äußere Ende der Sonnenatmosphäre. Bei ihrem Vorbeiflug im vergangenen April passierte Parker Solar Probe mehrfach diese Grenze, die sich nicht kugelförmig um die Sonne erstreckt, sondern zahlreiche Ausbuchtungen aufweist.

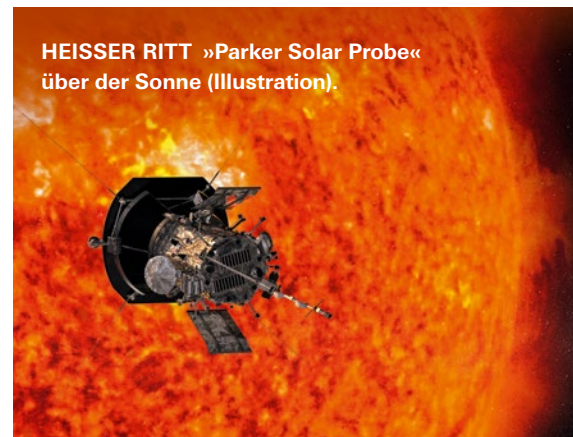
Bereits wenige Monate nach ihrem Start im August 2018 war die Raumsonde so nahe an die Sonne herangekommen wie kein anderes Raumschiff zuvor: auf 42,7 Millionen Kilometer. Bis zum Ende ihrer Mission wird sie

sich dem Zentralgestirn auf 6,16 Millionen Kilometer nähern. Geschützt von einem fast zwölf Zentimeter dicken Panzer aus Kohlenstofffaser hält das Fluggerät, das eine Masse von zirka 680 Kilogramm besitzt und die Größe eines Kleinwagens hat, extreme Hitze und Strahlung aus.

Die NASA verspricht sich von der bis 2025 angesetzten Mission unter anderem Erkenntnisse darüber, warum die Sonnenkorona um ein Vielfaches heißer ist als die Oberfläche – und was sich daraus hinsichtlich der Funktionsweise von Sternen ableiten lässt.

*Pressemitteilung der NASA vom 14. Dezember 2021*

**HEISSER RITT »Parker Solar Probe« über der Sonne (Illustration).**





# KOSMOLOGIE WENN GALAXIEN KOLLIDIEREN

Im Kosmos stoßen immer wieder Galaxien zusammen – mit dramatischen Folgen. Neue Erkenntnisse über solche Vorgänge enthüllen, was sich in einigen Milliarden Jahren auch zwischen unserer Milchstraße und ihrem nächsten großen Nachbarn abspielen wird.



**Aaron S. Evans** (links) ist Astronomieprofessor an der University of Virginia in Charlottesville. **Lee Armus** arbeitet am California Institute of Technology in Pasadena.

► [spektrum.de/artikel/1974532](https://spektrum.de/artikel/1974532)

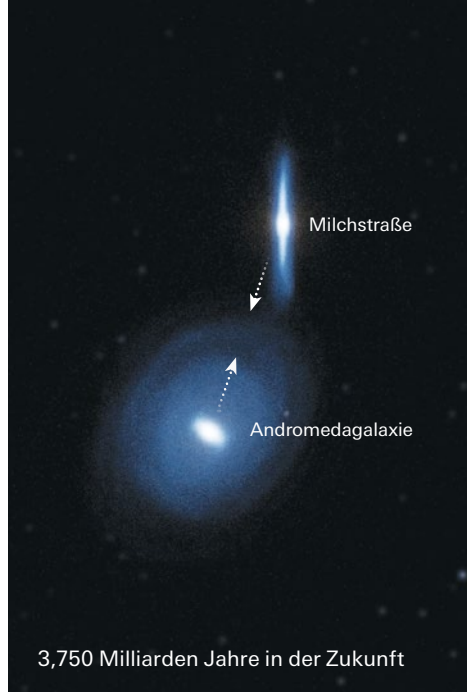
**MÖGLICHE ZUKUNFT** Die Illustration zeigt, wie das sich vereinigende Milchstraßen-Andromeda-System aus einiger Entfernung aussehen könnte. Im Vordergrund ist Pluto zu erkennen, der gemeinsam mit der zum Roten Riesen aufgeblähten Sonne weit aus der Ebene der Galaxis geschleudert wurde.

In etwa fünf Milliarden Jahren wird unsere Umgebung im All ganz anders aussehen. Nicht nur bläht sich die Sonne zu einem Roten Riesen auf, dessen feurige Hülle sich bis zur Erdumlaufbahn erstreckt. Darüber hinaus erfährt die gesamte Milchstraße einen dramatischen Wandel, denn sie kollidiert dann mit dem nächsten großen Nachbarn, der Andromedagalaxie. Wenn die Gravitation die beiden Gebilde unabwendbar zusammenbringt, werden ihre Bestandteile durch Begegnungen mit anderen Objekten aus ihren gewohnten Bahnen gerissen und neu gemischt. Leuchtende Sterne schießen als spektakuläre Schweife

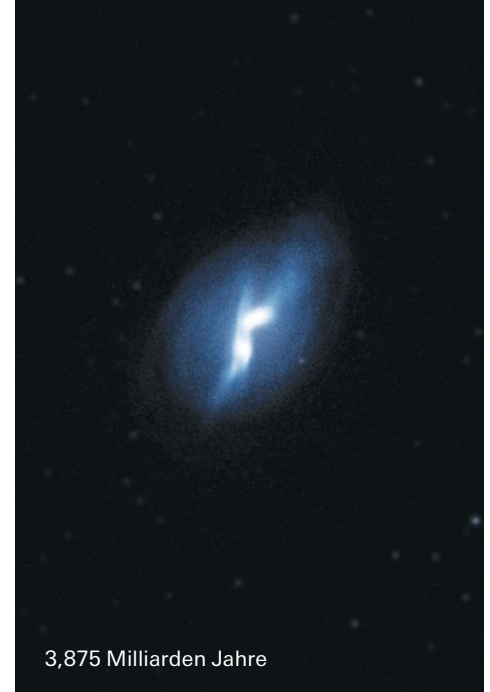
weit ins All, und Gas und Staub sammeln sich in den sich einander nähernden galaktischen Zentren. Von den imposanten Spiralstrukturen, die während fast drei Viertel der Existenz des Universums den Charakter der beiden Galaxien geprägt haben, bleibt immer weniger übrig.

Schließlich verschmelzen die Kernbereiche der Galaxien. Das nach innen strömende und von der Gravitation komprimierte Gas lässt die Rate der Sternentstehung regelrecht explodieren, auf das mehr als 100-Fache im Vergleich zur Menge an Sternen, die sich regelmäßig neu bilden. All die Materie füttert außerdem die supermassereichen Schwarzen Löcher, die sich in den Mittelpunkten der ursprünglichen Galaxien befanden. Sie wachsen und beschwören dabei einen Sturm energiereicher Teilchen herauf, der das Licht aller Sterne überstrahlt. Zuletzt nähern auch sie sich auf immer engeren Bahnen einander an und vereinigen sich letztendlich.

Trotz des ganzen Spektakels handelt es sich bei dem Prozess – der heute bereits in ähnlicher Weise überall um uns herum abläuft und in der Frühzeit des Universums noch



3,750 Milliarden Jahre in der Zukunft



3,875 Milliarden Jahre

viel häufiger vorkam – nicht wirklich um eine Kollision, zumindest nicht im eigentlichen Wortsinn. Galaxien bestehen größtenteils aus nichts. Die rund 300 Milliarden Sterne in der Milchstraße sind im Durchschnitt fast fünf Lichtjahre voneinander entfernt. Die mittlere Konzentration von Gas im interstellaren Raum ist etwa 100 Milliarden Mal geringer als die Dichte der irdischen Luft auf Meereshöhe. Obwohl eine Verschmelzung von Galaxien das Aussehen der beiden Partner auf großen Skalen grundlegend verändert und immense Energiemengen umgesetzt werden, bewegen sich die meisten Sterne während des Ereignisses relativ unbeeindruckt aneinander vorbei.

### Mit neuen Methoden zu ungeahnter Formenvielfalt

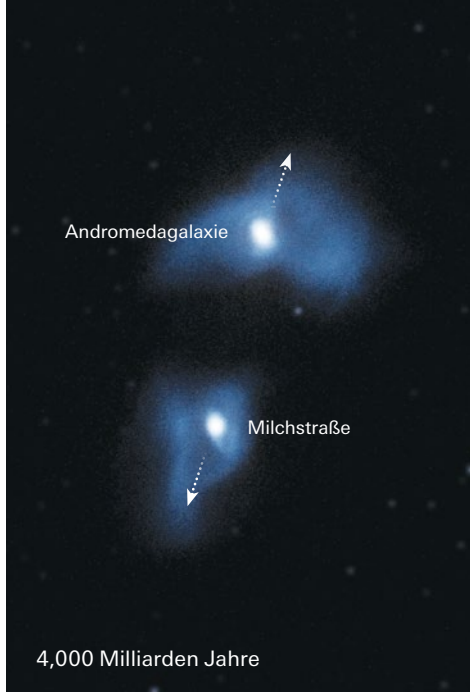
Nichtsdestoweniger sind die bei alledem ablaufenden Prozesse aus astronomischer Sicht faszinierend und bedeutsam. Genaue Untersuchungen gestatten uns nicht nur einen Ausblick auf die ferne Zukunft unserer Galaxis, sondern sie helfen uns darüber hinaus dabei, die Geschichte des gesamten Alls besser zu verstehen. Im jüngeren und dichteren Kosmos kollidierten Galaxien ständig. Simulationen deuten darauf hin, dass die Milchstraße in den letzten zehn Milliarden Jahren bis zu fünf größere Verschmelzungen durchgemacht hat, bevor sie zu der Spiralgalaxie wurde, die sie heute ist.

Lange fehlten die technischen Möglichkeiten zur sorgfältigen Messung und Modellierung der Vorgänge. Der Gutteil des Geschehens ist nämlich hinter dicken Staubwolken verborgen, die bei sichtbaren Wellenlängen selbst mit den leistungsfähigsten Teleskopen nur schwer zu durchdringen sind. Dank neuer Instrumente an bestehenden und geplanten Observatorien lassen sich einige Fragen nun aber zunehmend besser beantworten, etwa jene, wie Sterne während des Chaos einer galaktischen Kollision geboren werden oder wie die Strahlung der wachsenden und sich schließlich vereinigenden zentralen Schwarzen Löcher die Umgebung beeinflusst.

Wir wissen erst seit rund einem Jahrhundert überhaupt von der Existenz von Galaxien außerhalb unserer eigenen. Seinerzeit hat der US-Astronom Edwin Hubble herausge-

## AUF EINEN BLICK TANZ VON MILLIARDEN STERNEN

- 1** Galaxien bewegen sich in alle Richtungen durch das Universum. Treffen zwei aufeinander, vereinigen sie sich langsam durch die Anziehung der Schwerkraft.
- 2** Verwirbeltes Material befeuert die Sternentstehung, und Schwarze Löcher verschmelzen. Beides erzeugt intensive Strahlung. Viele Vorgänge sind hinter Staub verborgen und nur mit Spezialteleskopen erkennbar.
- 3** Solche Untersuchungen verraten auch etwas über die Zukunft der Milchstraße, die in einigen Milliarden Jahren mit der benachbarten Andromedagalaxie zusammenstoßen wird.



4,000 Milliarden Jahre



4,125 Milliarden Jahre



4,250 Milliarden Jahre

MISÄ, ESA, VISUALISATION: FRANK KUMMERS (LITSCHE), SIMULATION: CURTINA BESA (COLUMBIA UNIVERSITY), IRELAND VAN DER MAAREL (LITSCHE)

funden, dass viele der damals als Nebel bezeichneten leuchtenden Flecken am Himmel keine Objekte innerhalb der Milchstraße sind, sondern unabhängige »Welteninseln« darstellen. Er nannte sie extragalaktische Nebel und teilte sie in drei Kategorien ein: solche mit kugelartiger oder elliptischer Form (die elliptischen Galaxien), flache Scheiben mit einer Aufwölbung in der Mitte (»Bulge«) und Spiralarmen, die gelegentlich an einem längeren zentralen Balken ansetzen (die Spiralgalaxien, zu der die Milchstraße gehört) sowie unregelmäßig geformte Exemplare (die irregulären Galaxien).

Bei einem Teil der irregulären Galaxien handelt es sich tatsächlich um stark verzerrte Paare oder kleine Gruppen von Galaxien. In den Jahren nach Hubbles Entdeckung untersuchten Pioniere wie Boris Woronzow-Weljaminow von der Universität Moskau, Fritz Zwicky vom California Institute of Technology und Halton Arp von den Mount Wilson und Palomar Observatories solche zusammenhängenden Galaxien im Detail. 1966 veröffentlichte Bilder zeigen verzerrte Formen, die mit dem heutigen Wissen deutlich als typische Resultate von Verschmelzungen zu erkennen sind. In den 1970er Jahren modellierten die Brüder Juri und Alar Toomre in den USA mit Hilfe von Computern die Wechselwirkungen zwischen Scheibengalaxien. Trotz der wegen begrenzter Rechenleistung nötigen Vereinfachungen reproduzierten sie die beobachteten Formen mehrerer irregulärer Galaxien, im Speziellen lange Schweife von Sternen, die weit weggeschleudert werden. Diese und andere frühe Simulationen konnten die ungewöhnlichen, manchmal spektakulären Merkmale allein durch das Wirken der Gravitation erklären. Mit immer leistungsfähigeren Computern und ausgefeilteren Modellen ließen sich die Vielfalt der Wechselwirkungen zwischen Galaxien und die physikalischen Auswirkungen zunehmend genauer nachvollziehen.

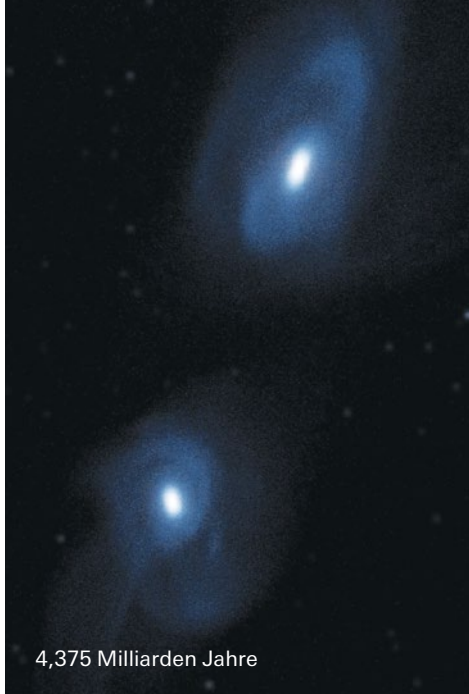
1983 startete der Infrarotsatellit IRAS. Er erstellte die erste Karte des gesamten Himmels im besonders langwelligen Bereich des Infrarotlichts. Das war ein Meilenstein für die Erforschung derjenigen Teile des Universums, die hinter Staubwolken verborgen sind. Dazu gehören vor allem die

## Chronologie zukünftiger Zusammenstöße

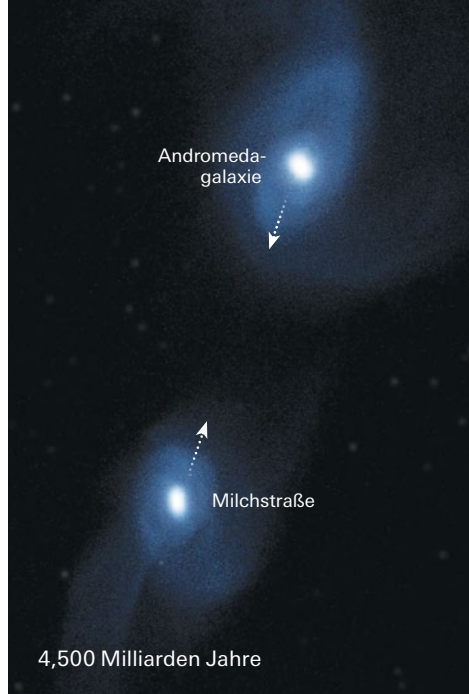
Unsere Milchstraße und die benachbarte Andromedagalaxie bewegen sich wegen der wechselseitigen Massenanziehung langsam aufeinander zu. In einigen Milliarden Jahren werden sie verschmelzen. Obwohl jede der Galaxien hunderte Milliarden von Himmelskörpern enthält, überstehen die allermeisten den Vorgang unbeschadet, weil die einzelnen Abstände enorm groß sind. Allerdings verlieren die Sterne ihre gewohnten Umlaufbahnen und gelangen an völlig andere Orte. Die Sequenz von Bildern stammt aus einer Computersimulation und geht von der mit dem Hubble-Weltraumteleskop gemessenen Bewegung der Andromedagalaxie aus. Nach einigem Hin und Her wird das Ergebnis eine einzige elliptische Galaxie ohne Spiralarme sein.

Galaxienverschmelzungen. Der Satellit erfasste die Wellenlängen der Wärmestrahlung von interstellarem Staub, der fast immer auf eine Kinderstube für Sterne hindeutet. Diese werden in normalen Galaxien aus Ansammlungen von molekularem Wasserstoffgas und Staub geboren. Letzterer setzt sich aus schwereren Elementen wie Kohlenstoff und Sauerstoff zusammen, die im Inneren der Sterne durch Kernfusion entstehen und im Zuge der stellaren Entwicklung ausgestoßen werden. In kollidierenden Galaxien laufen die entsprechenden Prozesse auf Hochtouren. Die Verschmelzung presst das weit verstreute Baumaterial in einzelnen Regionen regelrecht ineinander, was Wellen der Sternentstehung auslöst, so genannte Starbursts (siehe »Spektrum« Juni 2021, S. 60). Letztere produzieren wiederum zusätzliche schwere Elemente und Staub.

Obwohl junge und massereiche Sterne den größten Teil ihrer Energie im ultravioletten Wellenlängenbereich abge-



4,375 Milliarden Jahre



4,500 Milliarden Jahre



4,625 Milliarden Jahre

ben, gelangt nur wenig davon zur Erde. Die Staubpartikel in der Umgebung absorbieren das kurzwellige Licht und strahlen die Leistung im langwelligen Infraroten wieder ab. Teleskope mit dafür empfindlichen Detektoren lassen uns daher gewissermaßen durch den Schleier blicken und die frühesten Stadien der Sternentstehung und das Wachstum supermassereicher Schwarzer Löcher untersuchen.

Mit IRAS gelang die Entdeckung vieler solcher stellarer Kinderstuben in der Milchstraße und in tausenden weiteren Galaxien. Das verbesserte unser Verständnis von Kollisionen in zweierlei Hinsicht erheblich. Erstens ermöglichte IRAS genaue Messungen der bei den Vorgängen freigesetzten Energie und zeigte, dass verschmelzende Galaxien zu den leuchtkräftigsten Objekten im Weltall gehören. Zweitens machte IRAS die Prozesse anhand ihrer Infrarotemission bis in große Entfernungen sichtbar und gestattete damit die erste präzise Zählung von Galaxienkollisionen über ausgedehnte kosmische Zeitskalen. Das Licht einiger der Ereignisse begann sich zu verbreiten, als das Universum gerade einmal ein Fünftel seines heutigen Alters hatte. Bei manchen Galaxienzusammenschlüssen entfallen mehr als 90 Prozent der nach außen abgestrahlten Leistung auf den Bereich des sehr langwelligen Infraroten. Optischen Teleskopen bleibt die wahre Natur der Vorgänge völlig verborgen.

### Die Strahlkraft von Milliarden Sonnen

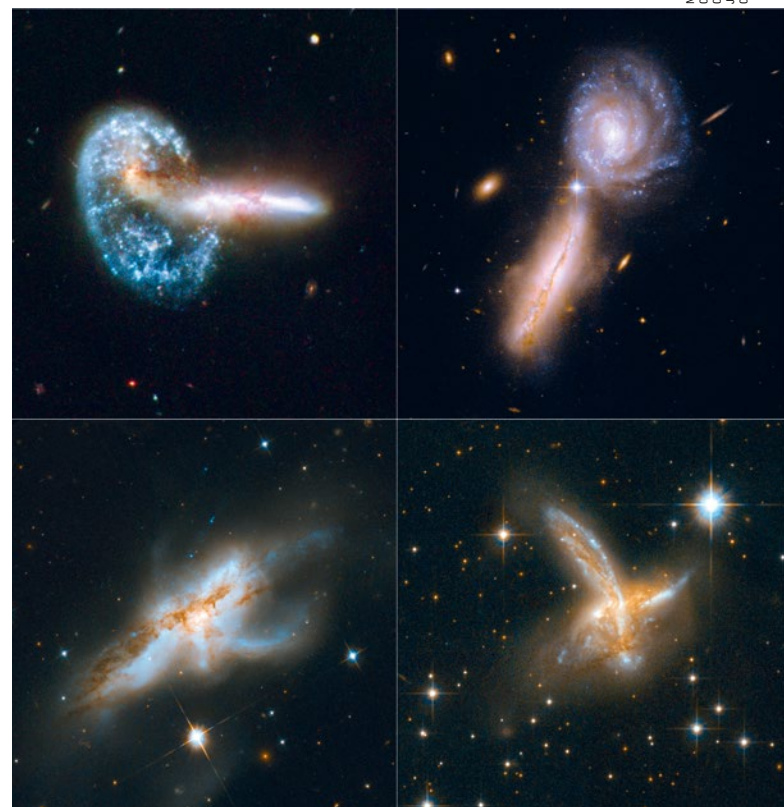
IRAS enthüllte eine Klasse von Galaxien, die als leuchtkräftige Infrarotgalaxien bezeichnet werden (luminous infrared galaxies, kurz LIRGs). Dabei handelt es sich häufig um Verschmelzungen. Die Objekte scheinen im Infrarotbereich besonders intensiv und geben hier etwa das Leistungsäquivalent von 100 Milliarden Sonnen ab. Noch seltener und spektakulärer sind ultraleuchtkräftige Infrarotgalaxien (ULIRGs), die zehnmal mehr Infrarotenergie produzieren, also die Leuchtkraft von einer Billion Sonnen haben.

In den späten 1980er Jahren stellten Astronomen eine Verbindung zwischen den Kernen kollidierender Galaxien zu einer anderen Klasse von Himmelskörpern her, den Quasaren. Diese sind die hellsten Objekte im Universum und

werden von supermassereichen Schwarzen Löchern angetrieben. Laut der Hypothese sind ULIRGs gewissermaßen eine Vorstufe von Quasaren. Die Idee basierte auf der Erkenntnis, dass Galaxien mit aktiven Schwarzen Löchern im Zentrum oft verzerrt aussehen, was auf eine vergangene Kollision hinweisen könnte.

Der Gedanke von einer Verwandtschaft zwischen leuchtkräftigen Infrarotgalaxien und Quasaren lieferte ein überprüfbares Modell, das zu weiteren Nachforschungen anregte. Theorien können nun besser den enormen Einfluss erfassen, den Zusammenstöße auf die Entwicklung von Galaxien insgesamt hatten. Die Rolle von Kollisionen für die

### WECHSELWIRKENDE GALAXIEN Diese Zusammenstellung verschiedener Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble zeigt die Formenvielfalt bei kosmischen Aufeinandertreffen.



NASA, ESA, VISUALIZATION: FRANK SIMMERS (STANFORD UNIVERSITY), IRELAND VAN DER MAREL (STSD)

NASA, ESA, THE HERBIE HERITAGE TEAM (STSD/AURA/ESA/HUBBLE COLLABORATION AND A. EVANS (UNIVERSITY OF VIRGINIA, CHARLOTTESVILLE/RAO/STONY BROOK UNIVERSITY), K. NOLL (STSD), J. WESPHAL (CATECH) (ESA/HUBBLE.ORG/IMAGES/RELEASES/00AA)/ CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

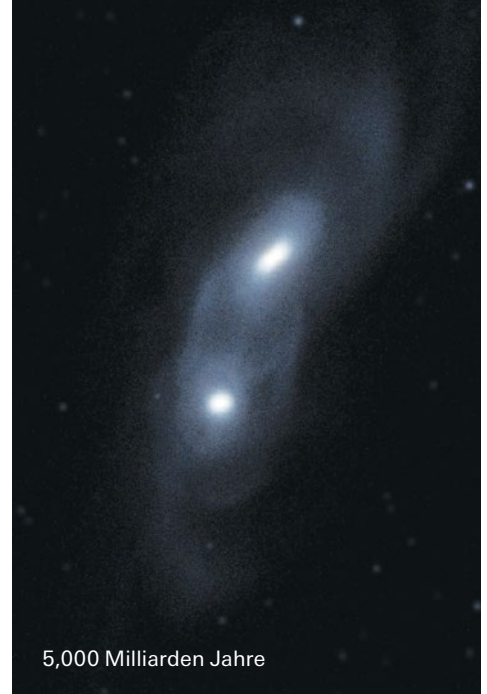




4,750 Milliarden Jahre



4,875 Milliarden Jahre



5,000 Milliarden Jahre

NASA, ESA, VISUALIZATION: FRANK SIMMERS  
 (STSC), SHARADON, GURMA, DESA, COLUIMBA  
 UNIVERSITY, IRELAND VAN DER MAREL (STSC)

NASA, ESA, THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSC/AURA/ESA/HUBBLE  
 COLLABORATION AND A. EVANS (UNIVERSITY OF VIRGINIA,  
 CHARLOTTESVILLE/ANDR/SNOY BROOK UNIVERSITY), K. NOLL (STSC),  
 J. WESPHAL (CALTECH) (ESA/HUBBLE ORIGINIMAGES/ESA/ESA/ESA/CC  
 BY 4.0 CREATIVE COMMONS ORG/LICENSING/4.0/DEED/CO/1)

kosmische Energiebilanz ist kaum zu überschätzen. Mehr als die Hälfte der Strahlung, die Sterne in der Geschichte des Universums jemals erzeugt haben, wurde durch Staub in Infrarotlicht umgewandelt.

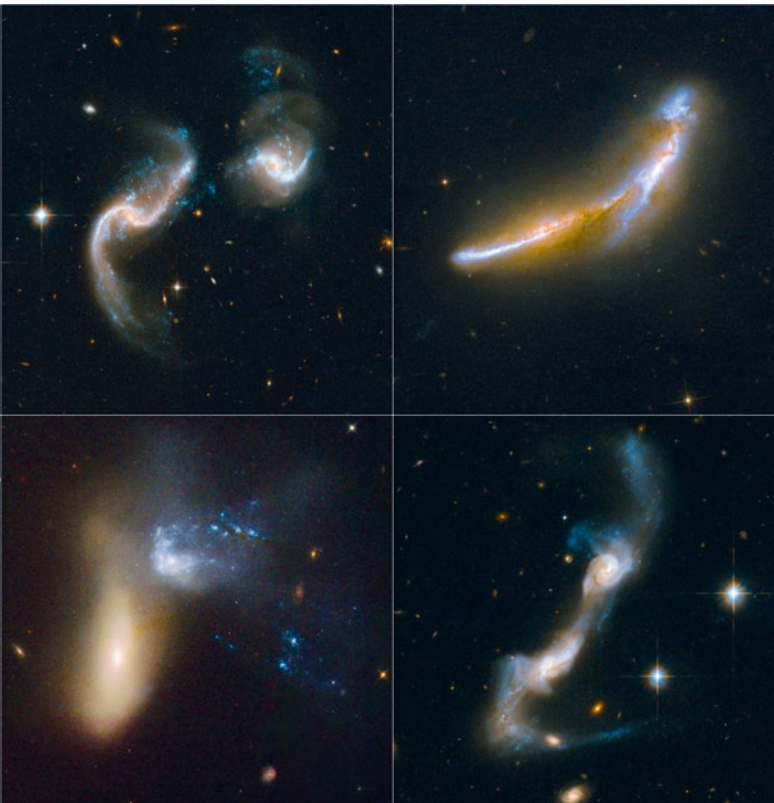
2004 haben wir gemeinsam mit vielen weiteren Kolleginnen und Kollegen den Great Observatories All-Sky LIRG Survey (GOALS) ins Leben gerufen. Die Beobertungskampagne trägt Bilder und spektrometrische Daten kollidierender Galaxien von den drei Weltraumteleskopen Spitzer, Hubble und Chandra zusammen. Der bis 2020 betriebene Satellit Spitzer fotografierte das Infrarote, Hubble erstellt Aufnahmen rund um den optischen Wellenlängenbereich, und Chandra ist für Röntgenstrahlung empfindlich.

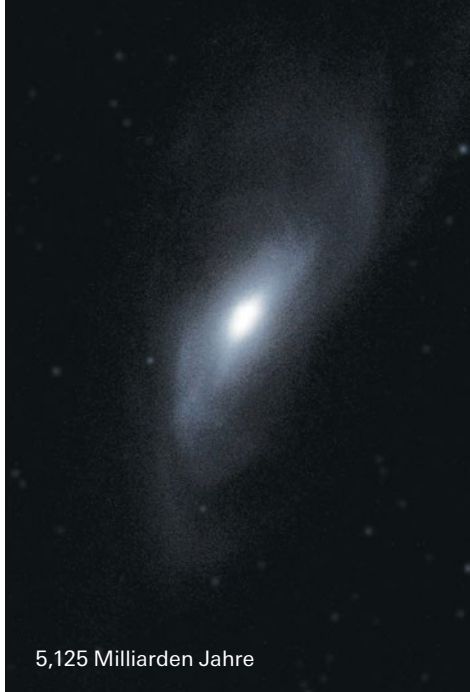
Gemeinsam bieten alle Instrumente also einen breit gefächerten Blick auf die Vorgänge während Galaxienkollisionen. Die GOALS-Sammlung umfasst die hellsten der leuchtkräftigen Infrarotgalaxien in unserer kosmischen Umgebung. Das sind mehr als 200 solcher Objekte bis zu

einer Entfernung von 1,3 Milliarden Lichtjahren. Unser Team nutzt außerdem zahlreiche weitere Teleskope. Dazu gehören bodengebundene wie das Very Large Array (VLA) in New Mexico, das Fünf-Meter-Teleskop Hale am Mount Palomar in Kalifornien, die beiden zehn Meter großen Keck-Teleskope auf Hawaii und das Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) in Chile. Wir verwenden darüber hinaus Daten des von 2009 bis 2013 betriebenen europäischen Herschel-Infrarotsatelliten und des NASA-Röntgenteleskops NuSTAR, das sehr energiereiche Strahlung einfängt.

GOALS hat unser Wissen über Galaxienkollisionen bereits erheblich erweitert. Lange war beispielsweise ungeklärt, was mehr zum ausgesandten Licht beiträgt: junge Sterne oder aktive Schwarze Löcher. Für eine Antwort muss man die jeweiligen Anteile zu verschiedenen Zeitpunkten während einer Verschmelzung unterscheiden. Hierfür bietet es sich an zu untersuchen, wie viel Energie die beiden Arten von Objekten bei den unterschiedlichen Wellenlängen freisetzen. Sterne sind in der Hinsicht recht einfache thermische Strahlungsquellen. Das Maximum ihrer Emission liegt bei einer bestimmten Wellenlänge, die von ihrer Temperatur abhängt, und bei kürzeren und längeren Wellenlängen fällt die abgegebene Energiemenge sehr schnell ab. Im Gegensatz dazu ist die Energie in der ausgedehnten und wirbelnden Akkretionsscheibe, die ein Schwarzes Loch mit Materie versorgt, viel breiter verteilt. Die Hitze nimmt in Richtung des Ereignishorizonts des Schwarzen Lochs allmählich zu und ist über einen weiten Wellenlängenbereich verschmiert. Es gibt einen viel größeren Anteil an besonders energiereicher Strahlung, die überdies Elektronen aus den Elementen im umgebenden Gas schlagen kann. Wenn man die Signale dergestalt ionisierter Atome im Emissionsspektrum einer Galaxie findet, ist das ein eindeutiges Indiz dafür, dass sich im Zentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch befindet, das von einer Akkretionsscheibe gespeist wird.

Der Auswertung von GOALS zufolge sind über die gesamte Population der leuchtkräftigen Infrarotgalaxien hinweg Starbursts eine wichtigere Energiequelle als

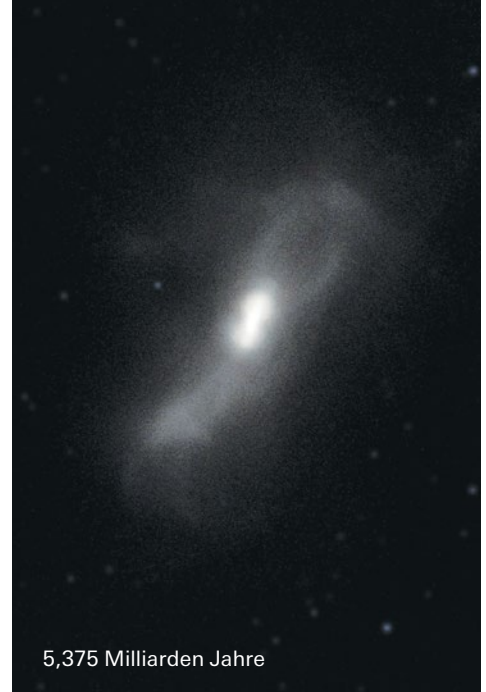




5,125 Milliarden Jahre



5,250 Milliarden Jahre



5,375 Milliarden Jahre

Schwarze Löcher. Etwa ein Fünftel aller analysierten LIRGs scheinen aktive supermassereiche Schwarze Löcher zu beherbergen, aber selbst in jenen Galaxien verursachen Sterne einen beträchtlichen Anteil der abgegebenen Energie. Möglicherweise übersehen wir dabei allerdings Schwarze Löcher, die so tief unter Staub begraben sind, dass sie selbst im Infraroten nicht zu erkennen sind. Tendenziell sehen wir Schwarze Löcher eher in den späten Stadien einer galaktischen Verschmelzung aufleuchten, was nahelegt, dass ihr Wachstum hinter der Sternentstehung zurückbleibt. So hätten Starbursts schlicht mehr Zeit, zur gesamten Energieabstrahlung beizutragen. Es ist Gegenstand zahlreicher aktueller Forschungsarbeiten, die genauen Zeitskalen herauszufinden, auf denen Sterne hervorgehen und die zentralen supermassereichen Schwarzen Löcher größer werden. Das könnte helfen, ein Rätsel zu lösen, das sich im Lauf der letzten zwei Jahrzehnte als sehr hartnäckig herausgestellt hat: Bei Galaxien beträgt das Verhältnis der Masse des zentralen Schwarzen Lochs zur Masse der Sterne im Bulge relativ einheitlich grob 1 zu 1000. Die genauen Ursachen dafür sind unklar.

Weitere jüngste Erkenntnisse stammen aus der Vermessung des Gases, das die massereichsten Sterne in kollidierenden Galaxien erhitzt. Der Großteil der neu gebildeten Sterne in LIRGs konzentriert sich auf extrem kompakte Starburst-Regionen. Diese Gebiete weisen Sternentstehungsraten und Gasdichten auf, die um mindestens das Zehnfache höher sind als in normalen Galaxien. Zu Beginn des Verschmelzungsprozesses befinden sich die aktivsten Sternentstehungsgebiete in der Regel in den Außenbereichen der LIRGs. Im weiteren Verlauf verlagern sich die Starbursts jedoch in Richtung der verschmelzenden Kerne, da Gas aus den Spiralarmen ins Zentrum stürzt.

Interessanterweise steigt bei ausgesprochen heftigen Kollisionen die Menge an molekularem Gas gegen Ende so stark an, dass der ganze Zentralbereich einer gigantischen Molekülwolke ähnelt. Ein Paradebeispiel für das Phänomen ist die mit einem Abstand von 250 Millionen Lichtjahren nächstgelegene ultraleuchtkräftige Infrarotgalaxie Arp 220 (der Name stammt aus der von Halton Arp angefertigten

Katalogisierung). Bei genauen Untersuchungen des molekularen Gases im Zentrum mit ALMA hat sich gezeigt, dass seine Menge dem Gasmaterial mehrerer Milchstraßen entspricht. Überdies beschränkt es sich auf eine Region mit einem Durchmesser von nicht mehr als 3000 Lichtjahren, was um den Faktor 20 kleiner ist als die Ausdehnung der Gasscheibe unserer Galaxis.

Galaxienzusammenschlüsse sind also gewaltige Sternfabriken. Doch die entstehenden Sterne haben mitunter eine überraschend kurze Lebensdauer. Anhand von Daten des Hubble-Weltraumteleskops ließ sich ein dramatischer Abfall der Anzahl der Sternhaufen in Abhängigkeit von deren Alter feststellen. Das lässt sich damit erklären, dass viele Sterne schon kurz nach ihrer Geburt wieder auseinandergerissen werden, entweder von den Gezeitenkräften der Gravitation oder von der Wucht benachbarter Sternexplosionen.

### Die kräftigsten Stürme des Universums

Nicht nur der Gasvorrat in den Sternhaufen wird auf diese Weise weggefegt. Sogar die ganze galaktische Verschmelzung kann durch ausgestoßene Energie von Supernovae und den Schwarzen Löchern im Zentrum ausgebremst werden und sich tief greifend verändern. Es kommt zu regelrechten Stürmen ionisierten Gases aus den kollidierenden Galaxien heraus. Erste Belege für solche Vorgänge gab es in den frühen 1990er Jahren bei einigen LIRGs und ULIRGs. Anschließendens Untersuchungen zufolge kommen derlei »Superwinde« häufig vor, und die schnellsten von ihnen können sogar der Anziehung der Galaxien dauerhaft entkommen und Materie in den intergalaktischen Raum schleudern.

Galaktische Superwinde können sowohl heißes als auch kaltes atomares und molekulares Gas enthalten, und zwar in enormen Mengen. Die Ströme erstrecken sich oft über 10000 Lichtjahre und führen manchmal mehr Material mit sich, als gleichzeitig in den Kernen zu Sternen wird. Das entzieht der Galaxie den Baustoff für die weitere Sternbildung. Zudem transportieren die Winde schwerere Elemente und Staub. In fast allen Fällen scheinen sie in der Nähe



5,500 Milliarden Jahre



5,625 Milliarden Jahre



5,750 Milliarden Jahre

NASA, ESA, VISUALIZATION: FRANK KUMMER (STSC), SKULLY (STON), CURTINA, BESA (COLUMBIA UNIVERSITY), IRIGLAIO VAN DER HAEGEL (STSC)

des Zentrums zu entstehen, angetrieben durch die kombinierte Wirkung von Supernovae, Strahlungsdruck und stark gebündelten Gasströmen («Jets») aus dem Schwarzen Loch. Die Superwinde spielen für den Lebenszyklus von Galaxien vermutlich eine wichtige Rolle und hängen ursächlich wohl mit den gleichen Rückkopplungsmechanismen zusammen, die auch die Sternentstehung im Zentrum begrenzen.

Viele Detailfragen über die Prozesse während Galaxienkollisionen dürfte das James-Webb-Weltraumteleskop (JWST) demnächst klären. Der Infrarotsatellit mit einem Spiegeldurchmesser von 6,5 Metern soll nach seinem erfolgreichen Start am 25. Dezember 2021 der wissenschaftliche Nachfolger von IRAS und Spitzer werden. Das JWST wird mindestens 50-mal empfindlicher sein und eine fast zehnfach höhere räumliche Auflösung bieten als Spitzer und entsprechend schärfere Bilder von Galaxien im nahen und mittleren Wellenlängenbereich des Infraroten liefern. Außerdem wird der Satellit dank eingebauter Spektrometer das Licht aus Sternentstehungsgebieten und der Umgebung der Akkretionsscheiben supermassereicher Schwarze Löcher genauestens vermessen können.

Unser GOALS-Team erhält bereits in den ersten Monaten nach der Inbetriebnahme des JWST die Chance zur Beobachtung vier nahe gelegener leuchtkräftiger Infrarotgalaxien. Andere Arbeitsgruppen werden mit dem Observatorium beispielsweise weit entfernte Quasare anvisieren und die Tiefen des Alls nach den ersten Galaxien durchsuchen. Die Objekte, die wir für GOALS so früh in den Blick nehmen, sind bereits für intensive Starbursts und aktive Schwarze Löcher in ihrem Zentrum bekannt. Sie befinden sich in den typischen Wirren einer Kollision und verlieren Gas durch Winde. Diese Galaxien werden uns als wertvolle Studienobjekte dienen und uns hoffentlich besser verstehen lassen, wie all die Prozesse schon im frühen Universum begonnen haben. Jenseits der allerersten Beobachtungspläne wurden für spätere Betriebsphasen des Teleskops mehrere andere Projekte ausgewählt, die sich etwa mit den Rückkopplungsmechanismen zwischen jungen Sternhaufen und aktiven Schwarzen Löchern beschäftigen oder versuchen, mehr

über die Sternentstehung in den staubigen Kernen von LIRGs herauszufinden, die mit optischen Wellenlängen nicht zu untersuchen ist.

Außerdem gibt es Pläne, das aus 27 Schüsseln bestehende Very Large Array in New Mexico bis Anfang der 2030er Jahre zu einem Radioteleskop der nächsten Generation aufzurüsten, das insgesamt 263 Antennen für Wellenlängen im Radio- und Millimeterbereich besitzt. Es könnte daraufhin Sternentstehungsgebiete, aktive Schwarze Löcher und das Licht von explodierenden Sternen mit zehnfach besserer Empfindlichkeit und Auflösung erfassen.

Solche eingehenderen Beobachtungen werden in Kombination mit immer leistungsfähigeren Computersimulationen in den kommenden Jahren viel mehr über die astrophysikalischen Vorgänge bei der Verschmelzung von Galaxien verraten, sowohl in unserer kosmischen Nachbarschaft als auch im frühen Universum. Gravitationswellendetektoren werden ebenfalls dazu beitragen, indem sie die charakteristischen Signaturen sich vereinigender supermassereicher Schwarzer Löcher bis in die entlegensten Bereiche des Kosmos nachweisbar machen. Ein ständig wachsendes und immer detailreicheres Verzeichnis der Phänomene wird uns nicht zuletzt das Schicksal besser verstehen lassen, das unserer Milchstraße in ferner Zukunft bevorsteht. ◀

#### QUELLEN

**Hayward, C. C., Hopkins, P. F.:** How stellar feedback simultaneously regulates star formation and drives outflows. *MNRAS* 465, 2017

**Larson, K. L. et al.:** Star-forming clumps in local luminous infrared galaxies. *The Astrophysical Journal* 888, 2020

**Linden, S. et al.:** Massive star cluster formation and destruction in luminous infrared galaxies in GOALS II: An ACS/WFC3 survey of nearby LIRGs. *ArXiv*, 2110.03638, 2021

**U, V. et al.:** Keck OSIRIS AO LIRG analysis (KOALA): Feedback in the nuclei of luminous infrared galaxies. *The Astrophysical Journal* 871, 2019

## KREBSMEDIZIN TUMOREN ZAPFEN DIE KRAFTWERKE DES IMMUNSYSTEMS AN

**Krebszellen nutzen viele Möglichkeiten, um die Körperabwehr zu überlisten. Eine neue Studie zeigt: Sie stehlen den Immunzellen sogar die Energieversorgung.**

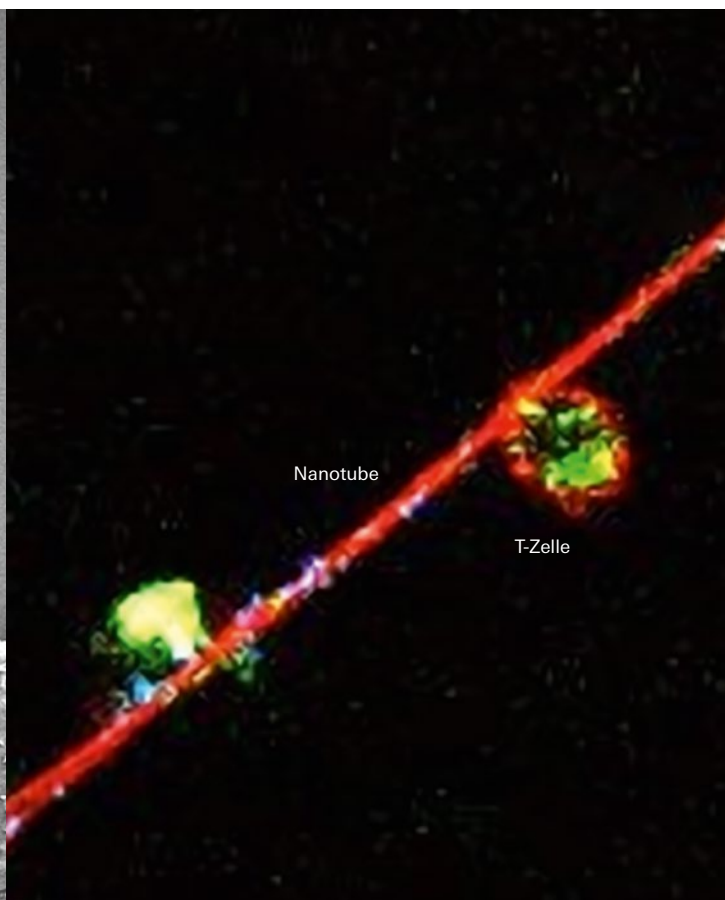
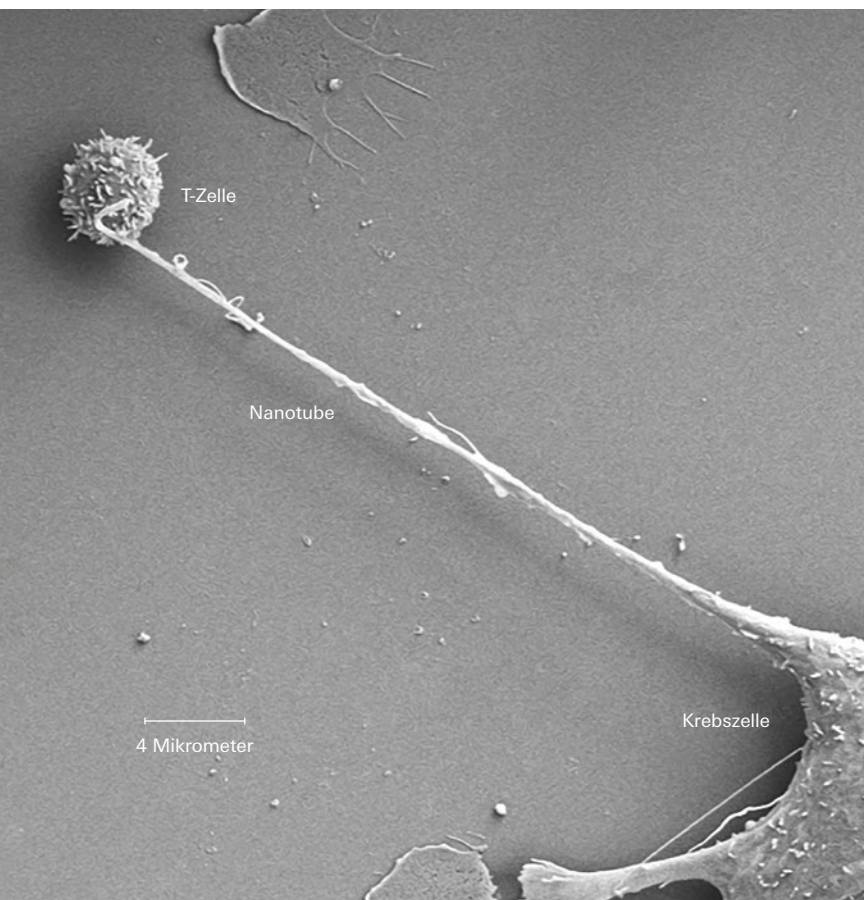
► Krebszellen überlisten die Körperabwehr, indem sie dem Immunsystem die Energie entziehen und für sich selbst nutzen. Das gelingt ihnen mit Hilfe winziger »Tentakel«, mit denen sie die Immunzellen buchstäblich auspumpen. Über diesen Mechanismus berichtet ein Team um den Mediziner Shiladitya Sengupta von der Harvard Medical School.

Die Forscherinnen und Forscher experimentierten mit Laborkulturen, in denen Krebs- zusammen mit Immunzellen wuchsen. Dabei nutzten sie Zellen aus Mäusen und Men-

schen. Beim Tumormaterial handelte es sich größtenteils um Zelllinien, die in der biomedizinischen Forschung als etablierte Modellsysteme dienen und ursprünglich aus Wucherungen des Brustdrüsengewebes, der Lunge und der Haut stammen. Die Immunzellen – natürliche Killerzellen sowie T-Lymphozyten – hatten eine davon unabhängige Herkunft: Das Team entnahm sie anderen Tieren als denen, von denen das Tumormaterial kam.

Als die Wissenschaftler die Zellkulturen mit einem Rasterelektronen-

mikroskop untersuchten, zeigte sich, dass die Krebszellen feine tentakelähnliche Fortsätze ausstrecken, mit denen sie die Immunzellen berühren. Diese Mini-Fangarme, auch »Nanotubes« genannt, sind meist dünner als ein Mikrometer (millionstel Meter) und können bis zu 100 Mikrometer lang werden. Mit den Tentakeln saugen die Krebszellen komplette Mitochondrien aus den Immunzellen und nehmen sie in sich auf. Das fanden die Forscher mittels eines Farbstoffs namens »MitoTracker Green« heraus, der grün fluoresziert



und sich fest an Proteine in den Mitochondrien bindet.

Mitochondrien sind Organellen, die ihre Wirtszellen mit energiereichen Molekülen versorgen und deshalb als »Kraftwerke der Zelle« gelten. Die Krebszellen haben einen handfesten Nutzen davon, sie zu stehen, wie das Team nachwies: Erstens schwächen sie damit die Körperabwehr, zweitens stärken sie ihre eigene Energieversorgung und gedeihen besser. So ergaben die Versuche der Forscher, dass die Tumorzellen nach dem Mitochondrien-Diebstahl mehr Sauerstoff pro Zeiteinheit verwerteten und ein deutlich gesteigertes Wachstum an den Tag legten. Die beraubten Immunzellen dagegen zeigten eine verminderte Atmungsaktivität und starben zum Teil ab.

Nicht nur unter Kulturbedingungen, sondern auch im lebenden Organismus eignen sich Krebszellen die Energielieferanten der Körperabwehr an, wie Sengupta und seine Kollegen nachwiesen. Das Team spritzte Versuchsmäusen verschiedene Arten von

## Krebszell-Tentakel in Aktion

Ein tentakelähnlicher Fortsatz, auch als »Nanotube« bezeichnet, erstreckt sich von einer Krebszelle zu einer Immunzelle (links im Bild, elektronenmikroskopische Aufnahme). Durch solche Schläuche hindurch rauben Krebszellen die Mitochondrien von Immunzellen. Grün leuchtende Fluoreszenzfarbstoffe machen sichtbar, wie die Mitochondrien durch die Fortsätze wandern (rechts im Bild, lichtmikroskopische Aufnahme). Dass es sich hierbei tatsächlich um die »Kraftwerke der Zelle« handelt, beweist ein zweiter Fluoreszenzmarker, der blau leuchtet und die Mitochondrien-DNA anfärbt.

Tumorzellen unter die Haut und stellte fest: Acht Tage später hatten die Krankheitserreger Mitochondrien in sich aufgenommen, die aus Immunzellen der Tiere stammten. Hinderte das Forscherteam die Krebszellen mit Hilfe der Chemikalie L-778123 daran, tentakelähnliche Fortsätze auszubilden, dann kam es deutlich seltener zum Mitochondrien-Klau – und die Tumoren, die in den Mäusen heranwuchsen, fielen merklich kleiner aus. L-778123 schränkt die Fähigkeit von Zellen ein, ihr Zytoskelett umzubauen, und erschwert es ihnen damit, ihre Gestalt zu ändern.

### Die Hemmung der Hemmung

Es ist schon lange bekannt, dass sich Krebszellen der Körperabwehr auf diverse Weise entziehen. Häufig tun sie das, indem sie so genannte Immuncheckpoints betätigen – das sind Rezeptormoleküle auf Immunzellen, die die Abwehrreaktion regulieren. Krebszellen stellen oft Moleküle her, die passgenau an diese Checkpoints koppeln und dadurch die Immunreaktion dämpfen. Mediziner versuchen das zu vermeiden, indem sie Substanzen namens Immuncheckpoint-Inhibitoren verabreichen (siehe Spektrum 8/2014, S. 30). Diese Stoffe sollen die Krebszellen daran hindern, die körpereigene Abwehr auszuschalten. Leider wirken sie nicht bei allen Patienten gleich gut, weshalb Forscherinnen und Forscher nach weiteren Methoden suchen, um Tumoren von einer Manipulation des Immunsystems abzuhalten.

In diesem Sinne versuchte die Arbeitsgruppe um Shiladitya Sengupta, ihre neuen Erkenntnisse therapeutisch zu nutzen. Dazu experimentierte sie mit Mäusen, die dazu neigen, Brustkrebs zu entwickeln. Die Tiere bekamen entweder die Chemikalie L-778123 oder einen Immuncheckpoint-Inhibitor oder beide zusammen in unterschiedlicher Dosierung. Es zeigte sich: Die kombinierte Behandlung schränkte das Tumorstadium stärker ein als die alleinige Gabe von L-778123 beziehungsweise des Inhibitors. Und dieser Effekt war umso größer, je mehr L-778123 verabreicht

wurde (bei gleich bleibender Inhibitor-Menge). Nach Angaben der Forscher vertrugen die Mäuse die Behandlung gut, auch bei den hohen Dosierungen.

Sengupta und sein Team hoffen, dass sich aus diesen Erkenntnissen ein neuer Ansatz für die klinische Krebstherapie entwickeln lässt. »Unsere Beobachtungen deuten darauf hin: Hindert man Tumorzellen daran, diese tentakelähnlichen Fortsätze auszubilden, und kombiniert das mit bereits existierenden Krebsimmuntherapien, könnte das die Behandlungsergebnisse verbessern«, sagt der Mediziner Tanmoy Saha, einer der beteiligten Wissenschaftler.

Der Tumorexperte Alpaslan Tasdogan von der Universität Duisburg-Essen, der an der Studie nicht mitwirkte, schätzt sie als einen wichtigen Beitrag ein: Nicht alle Immunzellen, die in einen Tumor eindringen, würden überleben, sondern nur jene, die hinsichtlich des Stoffwechsels an die Tumorumgebung adaptiert seien. Indem die Krebszellen diesen die Mitochondrien stehlen, könnten sie sich selbst anpassen und optimieren. Das zu verhindern, indem man die Tentakelbildung der Krebszellen unterbindet, hält Tasdogan für einen viel versprechenden Ansatz. »Allerdings fehlt es hierfür noch an einer Substanz, die hinreichend spezifisch wirkt – worauf die Autoren der Studie selbst hinweisen«, betont der Mediziner. ◀

**Frank Schubert** ist promovierter Biophysiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

### QUELLEN

**Kulkarni, A. et al.:** A designer self-assembled supramolecule amplifies macrophage immune responses against aggressive cancer. *Nature Biomedical Engineering* 2, 2018

**Saha, T. et al.:** Intercellular nanotubes mediate mitochondrial trafficking between cancer and immune cells. *Nature Nanotechnology* 17, 2022

**Wei, S. C. et al.:** Fundamental mechanisms of immune checkpoint blockade therapy. *Cancer Discovery* 8, 2018

## TEILCHENPHYSIK NEUTRINOS SIND NOCH MYSTERIÖSER ALS GEDACHT

**Bisherige Modelle zum Auswerten von Experimenten mit Neutrinos sind überraschend fehlerhaft. Das zeigte sich nun bei einer Überprüfung der Berechnungen mittels Elektronen.**

Unter den bekannten Elementarteilchen sind Neutrinos am schwierigsten zu beobachten, denn die allermeisten von ihnen durchdringen jedwede Materie spurlos. Extrem selten trifft ein Exemplar auf einen Atomkern und erzeugt bei dem Zusammenstoß andere Teilchen. Aus diesen lassen sich dann indirekt Rückschlüsse auf die ursprünglichen Eigenschaften des unsichtbaren Neutrinos ziehen. Nun deutet jedoch eine Untersuchung darauf hin, dass das nicht so gut funktioniert wie gedacht.

Neutrinos gelten als Schlüssel dafür, Schwächen im so genannten Standardmodell der Teilchenphysik aufzuspüren. Denn laut jenem dürften die Objekte theoretisch gar keine Masse haben. Allerdings ist genau das zahlreichen Experimenten zufolge aus den letzten Jahrzehnten trotzdem der Fall: Die drei bekannten Arten von Neutrinos wandeln sich ineinander um, und derlei quantenmechanische »Oszillationen« sind nur Masse tragen-

den Teilchen möglich. Genauere Vermessungen der Neutrinooszillation könnten Hinweise auf lang gesuchte Erweiterungen des Standardmodells geben. Deswegen sollen mehrere laufende und geplante Experimente präzisere Daten dazu liefern, wie schnell sich ein Neutrino eines Typs in das eines anderen umwandelt.

Eine bewährte Strategie dafür ist es, an einem Ort sehr viele Neutrinos herzustellen, etwa als Nebenprodukt der Reaktionen in Kernkraftwerken, und an anderen Stellen auf der Erde einige davon in Detektoren einzufangen. Diese enthalten typischerweise große Mengen hochreiner Stoffe, bei denen der gelegentliche Aufprall eines Neutrinos auf einen Atomkern einen charakteristischen Lichtblitz oder ähnliche Signale auslöst. Solch ein Labor kann man beispielsweise in der Nähe eines Atomreaktors bauen und messen, wie viele Neutrinos der dort erzeugten Art hindurchlaufen. In gleicher Richtung stellt man dann mit

einem zweiten, wesentlich weiter entfernten Instrument fest, wie viele an dieser Stelle noch übrig bleiben (siehe »Neutrinooszillation«). Wenn es weniger sind, als durch die normale Auffächerung und Verdünnung des Strahls zu erwarten wäre, muss sich der Rest auf der Reise in eine andere Sorte umgewandelt haben.

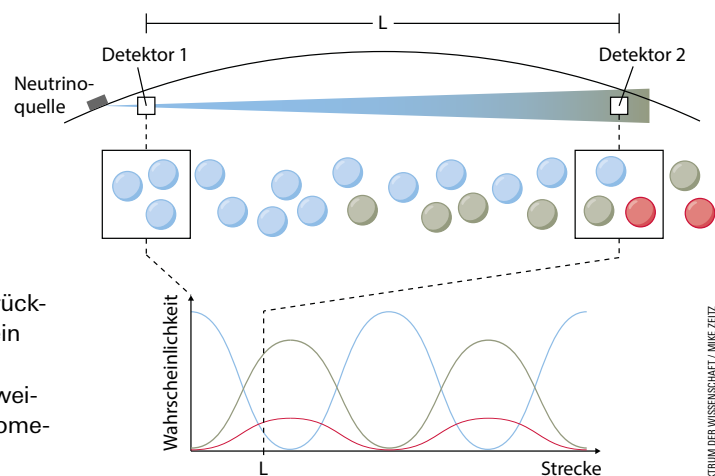
### Kompliziertes Fährtenlesen

Wie stark ein Neutrino zwischen verschiedenen Zuständen oszilliert, hängt von der zurückgelegten Entfernung sowie von seiner Energie ab. Erstere lässt sich leicht messen, Letztere hingegen nur indirekt bestimmen. Dazu braucht man Modelle über die Wechselwirkung mit einem Atomkern, die Art der Teilchen, die dabei entstehen, und die Richtungen, in die sie fliegen.

Das ausgeklügelte Formelwerk hilft, die Signale in den Detektoren zu interpretieren und auf die Energie des auslösenden Neutrinos zu schließen. Doch es ist praktisch schwer überprüf-

### Neutrinooszillation

Neutrinos kommen in drei Arten vor und können sich ineinander umwandeln. Wenn eine Quelle Teilchen einer bestimmten Sorte erzeugt (etwa ein Kernreaktor oder ein spezialisierter Beschleuniger), schwankt die Wahrscheinlichkeit, sie auf ihrem Weg weiterhin in diesem Zustand anzutreffen – je nachdem, welche Strecke  $L$  die Neutrinos zurücklegen und welche Energie sie haben. So misst ein Detektor unmittelbar beim Entstehungsort eine andere Zusammensetzung des Strahls als ein zweites, typischerweise hunderte oder tausende Kilometer entfernt installiertes Gerät.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ANKE ZEITZ

bar, wie gut die Modelle für ein bestimmtes Experiment überhaupt funktionieren. Schließlich lassen sich nicht einfach Neutrinostrahlen mit bekannter Energie erzeugen, um daran die Apparaturen zu kalibrieren und dann zu schauen, wie exakt die Vorhersagen der Computerprogramme für genau diese Energie zutreffen. Vielmehr entstehen Neutrinos etwa während der Kernzerfälle in einem Atomkraftwerk auf fundamental zufällige Weise. Hieraus geht ein breites Spektrum an Energien hervor.

Unter den speziellen Bedingungen jedes Versuchsaufbaus müssen die zahlreichen unbestimmten theoretischen Parameter angepasst werden, bis die Ergebnisse in sich schlüssig erscheinen. Dort lauern viele Fehlerquellen, die für Unsicherheiten bei der Interpretation der Daten sorgen.

Es wäre praktisch, wenn man die Grenzen der gängigen Modelle ausloten könnte, indem man dafür als Alternative zu Neutrinos vergleichbare,

aber deutlich leichter kontrollierbare und reichlich verfügbare Teilchen benutzt. Den Gedanken hat eine Gruppe um die US-Teilchenphysikerinnen Afroditi Papadopoulou und Marianna Khachatryan ausgearbeitet und geschickt umgesetzt. Im November 2021 berichtete das Team, wie es statt der kaum fassbaren Neutrinos die altbekannten Elektronen zum Überprüfen der Modelle heranzog. Trotz aller Unterschiede – Elektronen sind geladen und wesentlich schwerer – sind beide Teilchenarten miteinander verwandt, und Papadopoulou und Khachatryan konnten die erwartbaren Interaktionen von Neutrino- auf Elektronenstrahlen umrechnen.

Denn die eigentlichen Schwierigkeiten beim Anwenden der Formeln stecken im Verhalten der Bestandteile des getroffenen Atomkerns. Doch dieses ist in beiden Fällen mathematisch ähnlich, egal, mit welchem Mitglied der Teilchenfamilie die Kerne beschossen wurden, abgesehen von

Korrekturen für die unterschiedliche Stärke der Wechselwirkungen.

Falls das Modell für die Neutrinos also deren Ursprungsenergien richtig ermittelt, sollte es nach entsprechend sorgfältigen Umrechnungen auch für Elektronen passende Werte liefern. Die Forscherinnen nahmen sich die Daten eines Experiments vor, bei dem am Jefferson Lab im US-Bundesstaat Virginia systematisch Elektronenstrahlen verschiedener Energien auf Atomkerne geschossen und die dabei entstehenden Teilchen umfassend vermessen wurden. Hier waren Helium-, Kohlenstoff- und Eisenkerne von Interesse, die mit den Zielobjekten in Neutrinodetektoren vergleichbar sind. Auch die gewählten Elektronenenergien entsprechen denen typischer Neutrinoexperimente. Außerdem beschränkten die Physikerinnen ihre Analyse auf einfach zu interpretierende Ereignisse, um mögliche Fehlerquellen zu reduzieren.

Trotz des beträchtlichen Aufwands war die Bilanz ernüchternd: Die Model-

## Die Spektrum eLearningFlat



Mit der **eLearningFlat** erhalten Sie Zugriff auf eine Auswahl von sechs bis zu 40-minütigen E-Learning-Kursen aus dem Programm von iversity/SpringerNature.

Jeden Monat wird ein Kurs ausgetauscht, so dass Sie jährlich auf bis zu zwölf Kurse zugreifen können.

€ 99,- im Jahresabo oder € 8,99 im jederzeit kündbaren Monatsabo.

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



le schnitten sehr schlecht dabei ab, innerhalb eines Toleranzkorridors von fünf Prozent die korrekten Energien der Elektronenstrahlen zu liefern. Das gelang insgesamt bei weniger der Hälfte der Ereignisse, bei den Kohlenstoffkernen nur in etwa einem Drittel aller Fälle, beim Eisen nicht einmal zu einem Viertel.

Das theoretische Verständnis von den Wechselwirkungen der Neutrinos ist offenbar selbst in jenen Bereichen ausbaufähig, die bislang recht gut erfasst schienen. Die genauen Ur-

chen der Diskrepanz gilt es nun zu ergründen, damit die Modelle zuverlässiger werden. Das sei gerade jetzt wichtig, betont das Team mit Blick auf geplante Untersuchungskampagnen mit diversen im Bau befindlichen Großanlagen: »Nun, da wir in eine Ära der Präzisionsmessungen an Neutrinos eintreten, wird es entscheidend sein, die Modelle ebenso genau und zuverlässig zu machen.« Denn je besser die Rohdaten von zukünftigen Detektoren werden, desto wichtiger ist es, Ungenauigkeiten in den Modellen zu deren

Auswertung zu beseitigen. Sonst verschwindet die eigentlich angestrebte Präzision unter dicken Fehlerbalken und lässt unnötig vieles von den ohnehin mysteriösen Neutrinos im Dunklen. ◀

**Mike Zeitz** ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum«.

## QUELLE

**Khachatryan, M. et al.:** Electron-beam energy reconstruction for neutrino oscillation measurements. *Nature* 599, 2021

## INFORMATIONSTHEORIE DEN ZUFALL BEZWINGEN

**Dank hochdimensionaler Graphen ist es einem Forscherteam gelungen, einen lang gesuchten Code zu entwickeln. Dieser gibt sofort preis, ob eine Nachricht bei der Übertragung durch Rauschen beschädigt wurde.**

► Angenommen, Sie möchten eine Nachricht übermitteln. Sie wandeln dafür jedes Zeichen in eine Folge von Bits um, die Sie in Form eines Signals über Kupferleitungen, Glasfaser oder Luft versenden. Doch egal wie sehr Sie sich bemühen, wird der Code, der auf der anderen Seite ankommt, nicht exakt mit den ursprünglichen Daten übereinstimmen. Durch Rauschen entstehen bei der Übermittlung zwangsweise Fehler.

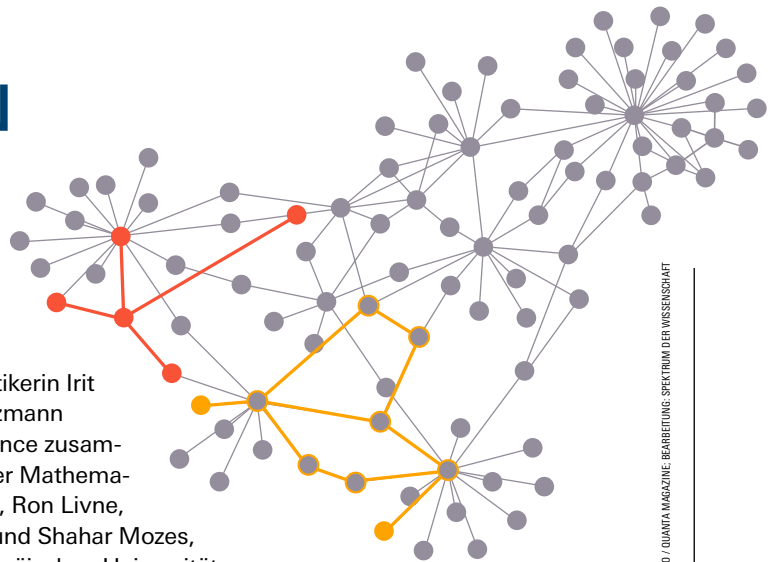
In den 1940er Jahren haben sich Fachleute erstmals mit diesem Problem auseinandergesetzt. Fünf Jahrzehnte später kamen sie auf eine interessante Idee: Sie suchten nach einer Codierung, aus der sich sofort klar erkennen lässt, ob eine Nachricht verändert wurde – ohne dass der Empfänger sie vollständig lesen muss. Diese Eigenschaft nennen sie »lokale Testbarkeit«, denn man sollte die Unversehrtheit an nur wenigen Stellen extrem schnell prüfen können.

In den folgenden 30 Jahren gab es zwar erhebliche Fortschritte auf dem Gebiet, aber die Bemühungen blieben erfolglos – bis jetzt. Im November 2021

hat die Informatikerin Irit Dinur vom Weizmann Institute of Science zusammen mit den vier Mathematikern Shai Evra, Ron Livne, Alex Lubotzky und Shahar Mozes, alle von der Hebräischen Universität Jerusalem, in einer noch nicht begutachteten Arbeit erstmals einen solchen Test gefunden. Mit ihrer Methode verwandelt man eine Nachricht in ein Objekt, das seinen Zustand bezeugt. Jede Verfälschung wird durch einfache Prüfungen sichtbar.

Frühere Codierungsmethoden stützten sich meist auf Zufälligkeit. Bei der lokalen Testbarkeit konnte der Zufall aber nicht helfen, stattdessen brauchte man eine völlig neue Art von Graph. »Es ist eines der bemerkenswertesten Phänomene, von denen ich in der Mathematik oder Informatik weiß«, so Tom Gur von der University of Warwick. »Es ist der heilige Gral eines ganzen Fachgebiets.«

Rauschen ist in der Kommunikation allgegenwärtig. Um es systematisch zu analysieren, stellt man Informationen als eine Folge von Bits (Einsen



SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

### Ein Sinnbild des Zufalls

Expander-Graphen entstehen, wenn man die Punkte eines Netzwerks willkürlich miteinander verbindet. Diese Eigenschaft macht sie zu geeigneten Objekten, um auf Zufälligkeit basierende Codes zu erzeugen.

Zwei grundlegende Eigenschaften von Expandern

#### Dünnheit

Jeder Punkt hat nur wenige direkte Nachbarn.

#### Verbundenheit

Die Punkte sind gut verbunden, es gibt keine Engpässe.



und Nullen) dar. Das Rauschen entspricht dann einer zufälligen Störung, die bestimmte Folgenglieder umkehrt. Es gibt viele Arten, damit umzugehen. Wenn man etwa die kurze Nachricht »01« versenden möchte, kann man Redundanz schaffen, indem man jedes Bit dreimal wiederholt: 000111. Wird das zweite und sechste Bit beschädigt, wandelt sich der Code zu 010110. Ein Empfänger kann die Fehler aber korrigieren, wenn er jeweils die Mehrheit der Bits in den Dreierblöcken als eigentliche Ziffer versteht.

Eine solche Änderung einer Folge ist eine Art der Codierung. Da sie in dem Fall eine Fehlerkorrektur enthält, nennt man derartige Varianten fehlerkorrigierende Codes. Nicht alle Verfahren dieser Art sind nützlich. Um gut zu funktionieren, müssen sie mehrere Bedingungen erfüllen. Die Wörter dürfen sich nicht zu sehr ähneln: Existieren 0000 und 0001, braucht es nur eine Bitänderung an Rauschen, um sie zu verwechseln. Außerdem sollten Codewörter nicht zu lang sein, denn obwohl sie dann robuster sind, verlängert sich die Sendezeit.

Diese zwei Eigenschaften bezeichnet man als Abstand und Rate. Ein guter Code sollte sowohl einen großen Abstand (Unterschied zwischen einzelnen Wörtern) als auch eine hohe Rate (Abfolge bei der Übertragung echter Informationen) aufweisen. Schon 1948 konnte der renommierte Mathematiker Claude Shannon beweisen, dass jeder Code, dessen Wörter zufällig ausgewählt werden, einen nahezu optimalen Kompromiss zwischen den beiden Merkmalen aufweist. Eine völlig zufällige Auswahl würde jedoch zu einem unvorhersehbaren Wörterbuch führen, das extrem schwer zu überblicken wäre. Es gibt also geeignete Codes, aber keine gut funktionierende Methode, um sie zu erstellen.

Daher arbeiteten Informatikerinnen und Informatiker die nächsten 40 Jahre daran, Ansätze für die Anordnung von Bits zu finden, die nicht zufällig waren. Ihre Ergebnisse wurden in den späten 1980er Jahren in allen möglichen Bereichen zur Fehlerkorrektur angewandt, von CDs bis hin zu Satellitenübertragungen.

1990 entstand schließlich die Idee der lokalen Testbarkeit. Dabei ging es nicht mehr primär darum, mit Rauschen umzugehen, sondern darum, überhaupt herauszufinden, ob eine Nachricht verfälscht wurde. In manchen Anwendungen ist es notwendig (etwa wenn man ein Passwort austauscht oder Daten auf einem Server liegen), zu überprüfen, ob ein Codewort beschädigt ist, bevor man es vollständig entschlüsselt. Allerdings erwies es sich als schwierig, lokale Testbarkeit umzusetzen.

Um das zu verstehen, kann man sich eine Nachricht als Graphen vorstellen. Diese bestehen aus einer Sammlung von Punkten, auch Knoten genannt, die durch Kanten verbunden sind. Dass sich Codes derart darstellen lassen, erkannte Richard Hamming zwei Jahre nach Shannons Arbeit.

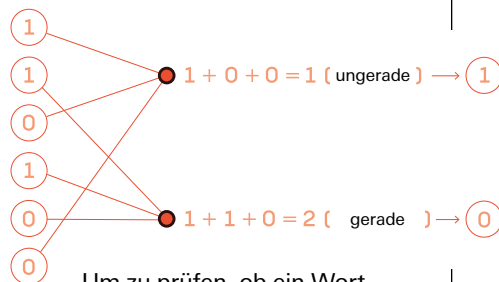
Seine Idee war, jede Nachricht mit einer Reihe von Belegen zu versehen, die der Summe bestimmter Bits entspricht. Ist das Ergebnis gerade, hat der Beleg den Wert null und sonst eins, man spricht von einem »Paritätsbit«, den man an bestimmte Stellen in Codewörter einfügt. Ein Empfänger kann erkennen, ob ein Wort Fehler enthält, indem er Summen nachrechnet und mit den Belegen vergleicht.

Aus einem solchen Hamming-Code lässt sich ein »paarer« Graph erzeugen, der zwei Mengen von Punkten miteinander verbindet. Man beginnt mit einem bestimmten Codewort: Links stehen untereinander die Knoten, die den Bits des Worts entsprechen. Diese ordnet man den »Paritätsknoten« rechts zu, also den Belegen. Man verbindet die Belege mit den zugehörigen Bits, die in der Summe auftauchen. Dadurch entsteht ein paarer Graph (siehe »Einen Graph codieren«).

1996 nutzten Michael Sipser und Daniel Spielman die Methode, um einen Code aus einem so genannten Expander-Graphen zu gewinnen. Ihr Ergebnis bot zwar keine lokale Testbarkeit, diente aber als Grundlage für die neueste Arbeit.

Expander-Graphen zeichnen sich durch zwei Eigenschaften aus, die auf den ersten Blick widersprüchlich erscheinen. Sie sind dünn, das heißt,

## Einen Graph codieren



Um zu prüfen, ob ein Wort fehlerbehaftet ist, kann man Belege einfügen: Diese addieren gewisse Bits auf und nehmen den Wert 0 an, falls die Summe gerade ist, und andernfalls 1. Solche »Paritätsbits« verbindet man durch Kanten mit jenen Punkten, die den summierten Bits entsprechen.

jeder Knoten ist mit relativ wenigen weiteren verbunden. Zugleich sind sie hochzusammenhängend, was bedeutet, dass es keine Knoten-Engpässe gibt, durch die nur wenige Kanten führen. Jeder Punkt ist also gut mit anderen vernetzt – trotz der geringen Anzahl an Kanten. Diese Eigenschaft machte sie zu idealen Kandidaten für lokale Testbarkeit. Wählt man die Verbindungen zwischen Knoten zufällig aus, entsteht unweigerlich ein Expander-Graph. Damit sind sie eine Quelle unverfälschten Zufalls, was sie zu natürlichen Bausteinen für die von Shannon erwähnten Codes mit optimaler Rate und optimalem Abstand macht.

Sipser und Spielman fanden heraus, wie man aus einem paaren Expander-Graphen einen Code gewinnen kann. Sie erzeugten ein solches Netzwerk, also zwei Reihen von Punkten, die sie willkürlich miteinander verbanden. Die Knoten auf der linken Seite entsprachen dabei kurzen Wörtern aus Hamming-Codes, und rechts befanden sich die Belege. Die neuen und längeren Codewörter für Expander-Codes erhielten sie, indem sie alle Kanten (denen man ebenfalls Werte wie null und eins zuweisen kann), die zu einem

Paritätsknoten führen, zusammenfügen. Allerdings ist das Ergebnis nicht lokal testbar. Angenommen, man hat ein Codewort aus einem Expander-Code und entfernt eine Kante zwischen einem Beleg und einem Bit (was der Änderung eines Bits im eigentlichen Codewort gleichkommt). Der modifizierte Graph würde dann zu mehr gültigen Wörtern führen, da es eine Bedingung weniger zu erfüllen gibt. Für jemanden, der mit dem ursprünglichen Code arbeitet, würden die neuen Wörter die Belege an allen Knoten bestätigen – mit Ausnahme des einen, an dem die Kante gelöscht wurde. Man muss also erst viele Stellen auf Fehler prüfen, bevor die Unstimmigkeit auffällt, weshalb sich Expander-Graphen nicht dazu eignen, lokale Testbarkeit umzusetzen.

Das Problem liegt in der Zufälligkeit der Netzwerke. Deshalb suchten Fachleute nach einem Weg, diese zu umgehen. In den 2000er Jahren fand man bereits einige Beispiele für lokale testbare Codes, allerdings auf Kosten anderer Eigenschaften wie Rate und Abstand. Je größer eine Nachricht wurde, desto mehr wuchsen die Codewörter oder umso mehr glichen sie sich. In einer Welt, in der riesige Datenmengen versendet und gespeichert werden, ist das ein Manko.

Die Existenz eines lokal testbaren Codes mit optimaler Rate und Entfernung, die sich mit der Nachrichtenlänge nicht verändern, wurde als  $c_3$ -Vermutung bekannt. Die früheren Erfolge ließen hoffen, man sei einer Lösung nah. Doch der Fortschritt verlangsamte sich, und schließlich befürchteten einige, die Hypothese könne sich als falsch erweisen.

Ein erster Durchbruch erfolgte 2017, als Dinur und Lubotzky bei einem einjährigen Forschungsprogramm am Israel Institute for Advanced Studies zusammenarbeiteten und auf ein Ergebnis des Mathematikers Howard Garland aus dem Jahr 1973 stießen. Während gewöhnliche Expander-Graphen aus eindimensionalen Strukturen bestehen, hatte Garland damals ein Objekt erdacht, das sich als hochdimensionaler Expander-Graph interpretieren lässt. Dessen Verbindungen

sind keine bloßen Linien, sondern Quadrate oder Würfel.

Garlands Graphen besitzen Eigenschaften, die für lokale Testbarkeit ideal erscheinen. Anders als ihre niedrigdimensionalen Varianten braucht man keinen Zufall, um sie zu erzeugen. Zudem sind die Knoten so miteinander verbunden, dass sich ihre lokalen Merkmale kaum von ihrem globalen Aussehen unterscheiden lassen. »Wenn man an einem Teil des Objekts eine winzige Modifikation vornimmt, ändert sich alles«, so Gur.

Lubotzky und Dinur versuchten, auf Grundlage von Garlands Arbeit einen Code zu erzeugen, der die  $c_3$ -Vermutung lösen könnte. Evra, Livne und Mozes, Experten für bestimmte Eigenschaften hochdimensionaler Expander-Graphen, schlossen sich dem Team an. Doch 2020 steckten sie fest. Denn die von Garland erdachten Objekte sind extrem kompliziert. Im folgenden Jahr bemerkten sie allerdings, dass man auch ohne hochdimensionale Expander auskommt.

## Ein raffiniertes Gewirr unendlicher Verzweigungen

Nun haben die Autoren gezeigt, wie man die Graphen zu einem neuen Netzwerk zusammensetzen kann, der zu einem optimalen, lokal testbaren Code führt. Sie nennen ihr Ergebnis einen »Links-rechts-Cayley-Komplex«. Wie in Garlands Arbeit sind dessen Bausteine keine eindimensionalen Kanten, sondern Quadrate. Jedes Informationsbit eines Codeworts wird einem Quadrat zugeordnet, und die Quittungen entsprechen den dazugehörigen Ecken und Kanten. Die Knoten legen also die Werte der Bits fest, die man damit verbinden kann.

Um ein Gefühl dafür zu bekommen, wie ein solcher Graph aussieht, kann man sich vorstellen, auf einer einzelnen Kante zu stehen. Jede davon ist mit einer festgelegten Anzahl von Quadraten verbunden. Von diesem Standpunkt aus wirkt es, als schaue man aus dem Rücken einer Broschüre heraus. Befände man sich auf einer anderen der vier möglichen Kanten eines Quadrats, hätte man einen vergleichbaren Blick. Die Broschüren

verzweigen sich von jeder Kante aus bis ins Unendliche weiter. Entscheidend ist, dass der komplizierte Graph ähnliche Eigenschaften wie ein Expander besitzt, aber strukturierter ist. Denn: »Was ist das Gegenteil von Zufälligkeit? Es ist Struktur«, sagt Evra.

Wie führt dieser Graph zu einem lokal testbaren Code? Dazu muss man sich an gewöhnliche Expander-Graphen zurückerinnern. Ist darin ein Bit (eine Kante) fehlerhaft, dann lässt sich der Fehler nur durch Überprüfung der Belege an den unmittelbar benachbarten Knoten feststellen. Ist in einem Links-rechts-Cayley-Komplex ein Bit (ein Quadrat) beschädigt, kann man das von mehreren Punkten aus erkennen, einschließlich einiger, die nicht einmal direkt miteinander verbunden sind. Somit kann ein Test an einem Knoten Informationen über Fehler an weit entfernten Orten offenbaren.

Der Code ist damit nicht nur lokal testbar, sondern behält die Rate, den Abstand und andere Eigenschaften bei – selbst wenn die Codewörter wachsen. Somit ist die  $c_3$ -Vermutung bestätigt. Praktische und theoretische Anwendungen sollten bald folgen: Verschiedene Formen von lokal testbaren Codes sind bereits im dezentralen Finanzwesen im Einsatz, wo die jetzt optimierte Version noch bessere Umsetzungen ermöglichen wird. ◀

**Mordechai Rorvig** ist Journalist, unter anderem bei »New Scientist« und »Quanta«.

## QUELLEN

**Dinur, I. et al.:** Locally testable codes with constant rate, distance, and locality. ArXiv 2111.04808, 2021

**Tanner, R.:** A recursive approach to low complexity codes. IEEE Transactions on Information Theory 27, 1981

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Researchers Defeat Randomness to Create Ideal Code« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



# SPRINGERS EINWÜRFE FREUNDLICHE MASCHINEN

**Neu eingeführtes Gerät wird nicht automatisch überall freudig aufgenommen. Die Akzeptanz ungewohnter Technik will klug vorbereitet sein.**

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

► [spektrum.de/artikel/1974535](https://spektrum.de/artikel/1974535)

**O**b ich mir die Zähne mechanisch oder elektrisch putze, betrachte ich als reine Geschmackssache. In einem selbstfahrenden Auto wäre mir allerdings mulmiger als in einem herkömmlichen. Und angesichts einer unbekannteren Internetseite schwanke ich unsicher zwischen Neugier und Furcht vor Datenklau.

Längst agieren wir in enger Symbiose mit technischen Apparaten. Dieses Zusammenleben ist nicht reibungslos; es weckt gemischte Gefühle. Am wohlsten ist uns, wenn wir das Gerät ganz und gar »beherrschen«, es routiniert gebrauchen können, als wäre es ein passives Werkzeug.

Doch oft besitzt das Instrument ein Eigenleben. Wir lassen uns auf ärztlichen Rat in eine laute Röhre schieben, die medizinische Daten über unser Körperinneres sammelt. Das geschieht immerhin aus freien Stücken. Wir nehmen mehr oder weniger unwillig hin, dass Videokameras unser Wohlverhalten im öffentlichen Raum kontrollieren.

All das und noch viel darüber hinaus fällt unter den Oberbegriff Mensch-Maschine-Interaktion (MMI). Ein Forschungszweig mit ebenjenem Namen untersucht, wie Individuen mit Computern, autonomen Geräten und virtueller Realität zurechtkommen. Selten wird dabei berücksichtigt, dass die digitale Technik auf eine höchst heterogene, nach Einkommen, Geschlecht und ethnischer Zugehörigkeit ausdifferenzierte Gesellschaft trifft.

An diesen für die Akzeptanzforschung wichtigen Umstand erinnern Tahira Reid und James Gibert, die an der Purdue University im US-Bundesstaat Indiana Maschinenbau unterrichten. Wie sie betonen, wird beim Entwickeln und Einführen neuer Technik stillschweigend eine Welt unterstellt, die aus wohlhabenden weißen Stadtbewohnern besteht (*Science* 375, S. 149–150, 2022).

Das beginnt schon damit, dass man bei akademischen oder privatwirtschaftlichen MMI-Untersu-

chungen als Testpersonen meist Studenten oder Firmenangestellte heranzieht. Daraus resultiert der Irrtum, ein Apparat der nächsten Generation würde ausnahmslos gut situierten Kunden und gebildeten Nutzern begegnen.

Wozu das führen kann, illustrierte 2016 der Spielfilm »I, Daniel Drake« von Ken Loach. Ein älterer Brite auf Jobsuche kommt mit dem volldigitalisierten Arbeitsamt überhaupt nicht zurecht. Als ihm jemand rät, doch einfach das richtige Symbol anzuklicken, presst er die Maus gegen den Bildschirm.

Im Fall der Gesichtserkennung per Video führt die ethnisch exklusive Auswahl des Testpersonals zum »algorithmischen Vorurteil«: Der Algorithmus identifiziert zwar Weiße ganz ausgezeichnet, irrt sich aber öfters bei Schwarzen und Asiaten. Übrigens gilt das auch umgekehrt. Eine in China oder Südkorea entwickelte Videoüberwachung liegt bei weißen Gesichtern häufiger falsch. Das ist die digitale Version des Satzes »Für mich sehen die alle irgendwie gleich aus«.

**D**ie MMI muss insbesondere dort fehlschlagen, wo versäumt wird, die Menschen auf eine eigens für Konfliktsituationen entwickelte Maschine vorzubereiten. Die New Yorker Polizei begann 2020 in mehreren Stadtteilen einen Roboter einzusetzen, den sie digitalen Hund, kurz Digidog, nannte. Er wurde beispielsweise vorgeschickt, um vor einer möglichen Schießerei die Lage zu erkunden. Das künstliche Wesen sah gruselig aus, es glich eher einer vierbeinigen Giftspinne als einem mechanischen Haustier. Nach einem Jahr wurde das kostspielige Experiment eingestellt, da es, statt zu Entspannung kritischer Situationen beizutragen, Entsetzen und Wut verbreitete.

Die Professorin und der Professor für Maschinenbau – nicht zufällig Afroamerikaner – fordern deshalb, künftig spezielle Gremien einzurichten, die Leitlinien für eine sozial und ethnisch sensibilisierte Mensch-Maschine-Interaktion erarbeiten.

# MEDIZIN DER VERSCHLUNGENE WEG ZUM RNA-IMPfstoff

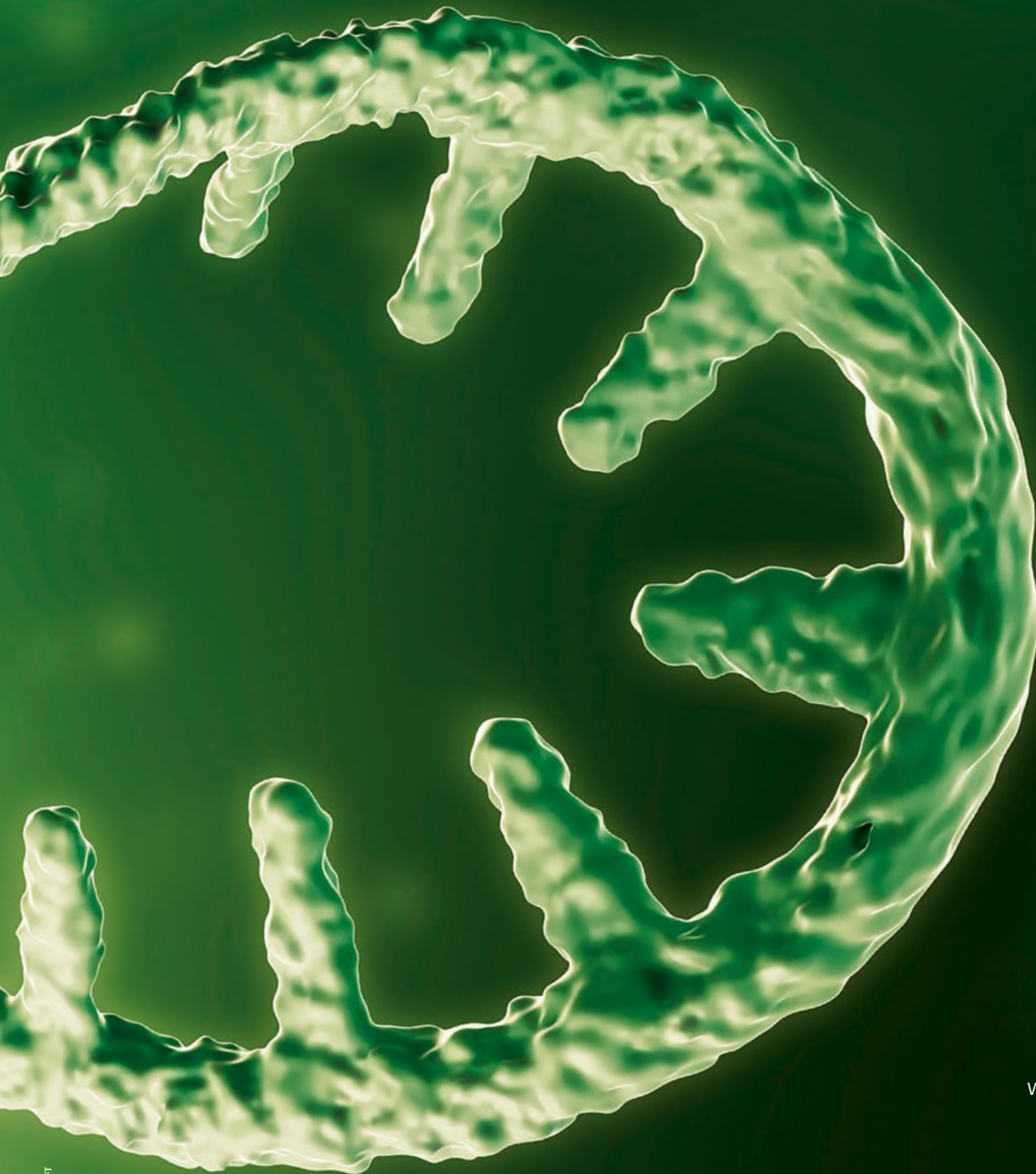
## AUF EINEN BLICK NÜTZLICHE BOTEN-RNA

- 1** Die Covid-19-Pandemie hat die Entwicklung von mRNA-Impfstoffen stark beschleunigt. Neu sind sie aber nicht: Die Forschung an ihnen reicht Jahrzehnte zurück.
- 2** Auf dem Weg zum fertigen RNA-Vakzin waren viele Hürden zu nehmen. Wichtige Innovationen betrafen die chemische Struktur der RNA und ihre Lipid-Verpackung.
- 3** Obwohl einzelne Namen oft genannt werden, ist der Siegeszug der RNA-Impfstoffe letztlich eine wissenschaftliche Kollektivleistung.

### INFORMATIONSTRÄGER

RNA-Moleküle dienen in Zellen dazu, den Bauplan der Proteine zu übermitteln. Zudem lassen sie sich als medizinische Wirkstoffe nutzen.

Die Geschichte der RNA-Vakzine illustriert, wie hürdenreich Forschung ist – und wie sehr sie auf Teamarbeit beruht. Hätten nicht hunderte Wissenschaftler ihren Beitrag geleistet, könnten diese neuen Impfstoffe heute nicht Menschenleben retten.



**Elie Dolgin** ist Wissenschaftsjournalist in Somerville, Massachusetts.

» [spektrum.de/artikel/1974538](https://spektrum.de/artikel/1974538)

Ende des Jahres 1987 führte Robert Malone ein revolutionäres Experiment durch: Er vermischte Boten-RNA (mRNA) mit Fetttropfchen zu einer Art molekularem Eintopf. Als er menschliche Zellen in diese Suppe tauchte, beobachtete er, dass die Zellen die mRNA aufnahmen und in Proteine übersetzten. Malone, damals Doktorand am Salk Institute for Biological Studies im kalifornischen La Jolla, erkannte das enorme medizinische Potenzial seiner Entdeckung. Am 11. Januar 1988 hielt er deshalb eine Idee in seinem Notizbuch fest: Wenn Zellen aus mRNA, die ihnen zugeführt wird, Proteine bilden, dann sei es möglich, RNA als Medikament zu nutzen.

Dem Forscher erschien der Eintrag so wichtig, dass er ihn datierte und seine Unterschrift darunter setzte. Zur Sicherheit ließ er noch ein weiteres Mitglied des Salk Institute unterschreiben. Ein Jahr später zeigte Malone, dass auch Froschembryonen mRNA aus einer lipidhaltigen Lösung aufnehmen. Erstmals hatte damit jemand Fetttropfchen genutzt, um Boten-RNA in einen lebenden Organismus einzuschleusen.

Die Experimente des Molekularbiologen legten den Grundstein für die Entwicklung zweier höchst bedeutender und profitabler Impfstoffe der Geschichte: die mRNA-Vakzine von Biontech/Pfizer beziehungsweise Moderna gegen Covid-19, die bislang hunderten Millionen Menschen auf der ganzen Welt verabreicht worden sind. Der Umsatz, den die Firmen mit den beiden Präparaten erzielen, beläuft sich allein für 2021 auf weit über 50 Milliarden US-Dollar.

Doch der Weg zum erfolgreichen mRNA-Impfstoff war lang und steinig. Dutzende Arbeitsgruppen und Unterneh-

men rund um den Globus bissen sich in den Jahren nach Malones Experimenten die Zähne daran aus, die richtige Mixtur aus Lipiden und Nukleinsäuren zu finden, um den Einsatz der Boten-RNA als Medikament oder Impfstoff zu ermöglichen. Viele betrachteten mRNA als zu instabil und zu teuer in der Herstellung, als dass sich diese Vision jemals realisieren ließe.

Die heutigen mRNA-Impfstoffe basieren auf Fortschritten, die viele Jahre nach Malones wegweisenden Experimenten erreicht wurden. Dazu gehören chemische Veränderungen am RNA-Strang und neue Arten von Lipidbläschen, welche die Boten-RNA effektiv in Zellen einschleusen (siehe Grafik »Blick ins Innere eines mRNA-Impfstoffs«). Malone ist gleichwohl der Ansicht, sein Beitrag finde nicht ausreichend Würdigung. »Man hat mich einfach aus der Geschichte herausgeschrieben«, erklärt er gegenüber der Fachzeitschrift »Nature«. Der Forscher bezeichnet sich als Erfinder der mRNA-Impfstoffe.

Der Streit darüber, wem die meiste Anerkennung für die Entwicklung der mRNA-Impfstoffe gebühre, spitzt sich seit einiger Zeit zu. Denn viele rechnen damit, dass die Schlüsselfiguren in den kommenden Jahren den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin zugesprochen bekommen. Doch prestigeträchtige Auszeichnungen, die immer nur einige wenige Menschen erhalten, lenken davon ab, wie viele tatsächlich dazu beigetragen haben, dass mRNA heute erfolgreich medizinischen Zwecken dient. In den zurückliegenden 30 Jahren war die Arbeit hunderter Forscherinnen und Forscher nötig, um die Vision von mRNA-Impfstoffen wahr werden zu lassen.

**mRNA**

...CGAGΨΨCGΨGΨΨAA...

Die Impfstoffe von Moderna und Biontech/Pfizer nutzen modifizierte mRNA, bei der das Nukleotid Uridin durch Pseudouridin (Ψ) ersetzt ist. Dadurch attackiert das Immunsystem die mRNA nicht.

Um dem Körper zu helfen, eine passende Immunreaktion auf das Coronavirus zu entwickeln, ist die mRNA-Sequenz so verändert, dass sie das Spike-Protein in der Konformation stabilisiert, die es beim Verschmelzen mit menschlichen Zellen einnimmt.

**Lipid-Nanopartikel**

mRNA

Phospholipid    Cholesterol    ionisierbares Lipid    PEG-Lipid\*

**Blick ins Innere eines mRNA-Impfstoffs**

mRNA-Impfstoffe gegen Covid-19 nutzen Lipid-Nanopartikel, winzige Bläschen aus Lipidmolekülen, um Boten-RNA in Zellen einzuschleusen. Letztere trägt den genetischen Code, der den Zellen erlaubt, das Spike-Protein herzustellen, mit dem das Coronavirus in die Zellen eindringt. Links in diesem Kasten sind jene Innovationen aufgelistet, die für die Entwicklung der Vakzine am bedeutsamsten waren.

Die Nanopartikel, die die mRNA umhüllen, bestehen aus vier Sorten von Lipidmolekülen. Eine davon ist ionisierbar: Im Impfstoffpräparat ist sie positiv geladen und hängt an der negativ geladenen RNA. Im Blutstrom verliert sie diese Ladung durch die basischen Bedingungen allerdings wieder, was den Impfstoff verträglicher macht.

\* an Polyethylenglykol gebundenes Lipid

NIK SPENCER/NATURE; NACH BUSCHMANN, M.D. ET AL.: NANOMATERIAL DELIVERY SYSTEMS FOR mRNA VACCINES. VACCINES 9, 2021; DOLGIN, E.: THE TANGLED HISTORY OF mRNA VACCINES. NATURE 597, 2021; DT. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Geschichte dieser Vakzine illustriert eindrücklich, was alles dazugehört, um aus wissenschaftlicher Erkenntnis Innovationen zu machen, die das Leben von Milliarden Menschen verändern: jahrzehntelange Forschung, die immer wieder in der Sackgasse landet. Zurückweisungen und Streit über potenzielle Profite. Aber auch Großzügigkeit, Neugier und Durchhaltevermögen angesichts von Skepsis und Zweifeln. »Es ist ein langer, langer Marsch«, sagt Paul Krieg, Entwicklungsbiologe an der University of Arizona in Tucson, der Mitte der 1980er Jahre einschlägige Forschungsbeiträge lieferte. »Und man weiß nie, wohin er führt.«

Malones Experimente in den 1980ern kamen nicht aus heiterem Himmel. Schon 1978 hatten Forscher kleine Bläschen mit einer lipidhaltigen Hülle genutzt, so genannte Liposomen, um mRNA in tierische Zellen einzuschleusen und so die Herstellung von Proteinen anzuregen. Die Liposomen umhüllten und schützten die mRNA und setzten sie ins Innere ihrer Zielzellen frei, nachdem sie mit deren Membranen verschmolzen waren.

Dem wiederum vorausgegangen waren jahrelange Forschungsarbeiten mit Liposomen und Boten-RNA, die beide in den 1960er Jahren entdeckt worden waren (siehe Grafik »Geschichte der mRNA-Impfstoffe«). Damals sahen nur wenige Forscher in der mRNA einen Kandidaten für medizinische Wirkstoffe – unter anderem, weil es seinerzeit keinen Weg gab, sie künstlich im Labor zu erzeugen. Der wissenschaftliche Fokus lag stattdessen auf dem Erforschen grundlegender molekularer Prozesse in Lebewesen. Die meisten Wissenschaftler verwendeten dafür mRNA aus Kaninchenblut, gezüchteten Mäusezellen oder einer anderen tierischen Quelle.

### Impfstoffe waren anfangs kein Thema

Das änderte sich 1984, als es einem Team (darunter Paul Krieg) um die Biologen Douglas Melton, Tom Maniatis und Michael Green von der Harvard University gelang, biologisch aktive mRNA im Labor herzustellen. Krieg und seine Kollegen nutzten hierfür ein RNA-Synthese-Enzym, das sie einem Virus entnommen hatten – eine Methode, die abgewandelt noch heute zum Einsatz kommt. Anschließend injizierten sie die künstliche Nukleinsäure in Froscheier und wiesen nach, dass sie dort genauso funktioniert wie natürliche Boten-RNA.

Melton und Krieg betrachteten die synthetische mRNA zunächst vor allem als Instrument, mit dem sich die Funktionsweise von Genen untersuchen ließ, wie sie heute sagen. Im Jahr 1987 aber entdeckte Melton, dass sich Boten-RNA sowohl zum Aktivieren als auch zum Unterdrücken der Proteinproduktion einsetzen lässt. Daraufhin half er, das Unternehmen Oligogen zu gründen (später umbenannt in Gilead Sciences). Die Firma sollte erforschen, wie sich mit künstlicher RNA gezielt Gene stummschalten lassen, um Krankheiten zu behandeln. Impfstoffe hingegen waren für ihn kein Thema.

»RNA hatte den Ruf, unfassbar instabil zu sein«, erinnert sich Krieg. »Alles, was mit ihr zu tun hatte, war mit äußerster Vorsicht zu genießen.« Hier liegt ein möglicher Grund, warum die Technologieentwicklungsabteilung der Harvard



MIT FOTO: GEN. VON ROBERT MALONE

**PIONIER** Der Molekularbiologe Robert Malone führte wegweisende Experimente mit mRNA durch. Später zerstritt er sich mit seinen Kollegen.

University das RNA-Synthese-Verfahren des Teams damals nicht patentieren ließ. Stattdessen übergaben die Forscher ihr Knowhow und ihre Reagenzien der Promega Corporation, einem Unternehmen für Laborbedarf in Madison (Wisconsin), das die Methode bald weiteren Arbeitsgruppen zugänglich machte. Als Gegenleistung gab es ein bescheidenes Honorar und eine Kiste Champagner.

Malone nutzte Jahre später den in Harvard entwickelten RNA-Syntheseansatz für seine eigenen Arbeiten. Jedoch kombinierte er die Nukleinsäureschnipsel mit einer neuen Art von Liposomen, die positive elektrische Ladungen trugen. Das verstärkte deren Bindung an den negativ geladenen Ribose-Phosphat-Strang der mRNA. Entwickelt hatte diese Lipidbläschen der Biochemiker Philip Felgner, der heute das Impfstoffforschungs- und Entwicklungszentrum an der University of California in Irvine leitet.

Obwohl es ihm gelang, Boten-RNA mit Hilfe von Liposomen in menschliche Zellen und Froschembryonen einzuschleusen, erlangte Malone nie einen Dokortitel. Er zerstritt sich mit seinem Doktorvater, dem Genetiker Inder Verma vom Salk Institute, und verließ 1989 den universitären Betrieb, um für Philip Felgner bei Vical zu arbeiten, einem frisch gegründeten Start-up-Unternehmen in San Diego, Kalifornien. Dort wiesen die beiden gemeinsam mit Forschern der University of Wisconsin-Madison nach, dass sich mit Lipid-mRNA-Komplexen die Proteinproduktion in Mäusen beeinflussen lässt.

Im März 1989 begannen sowohl Vical gemeinsam mit der University of Wisconsin als auch das Salk Institute, Patente auf Lipid-mRNA-Komplexe anzumelden. Doch Letzteres gab seinen Patentanspruch schon bald auf, und 1990 schloss sich Verma dem Beirat von Vical an.

Malone behauptet heute, Verma und die Vertreter von Vical hätten damals in Hinterzimmer-Deals ausgemacht, dass sein geistiges Eigentum an Vical übergehe. Zwar galt Malone als einer von mehreren Erfindern, doch er verdiente nicht an späteren Lizenzvereinbarungen mit – wie es bei einem Salk-Patent der Fall gewesen wäre. »Die haben sich an meinen Erfindungen und Entwicklungen bereichert«, beklagt der Forscher. Seine ehemaligen Kollegen weisen diesen Vorwurf kategorisch zurück. »Das ist völliger Unsinn«, betont Verma gegenüber »Nature«. Die Entscheidung des Salk Institute, den Patentantrag fallen zu lassen, sei ausschließlich dort getroffen worden.

## »Wenn Sie mich damals gefragt hätten, ob man einem Menschen RNA als Impfstoff injizieren kann, hätte ich Ihnen den Vogel gezeigt«

Matt Winkler, Unternehmer

Im August 1989 kehrte Malone dem Unternehmen Vical den Rücken. Er begründete dies mit Meinungsverschiedenheiten zwischen ihm und Felgner hinsichtlich »wissenschaftlichen Urteilsvermögens« und der »Anerkennung meiner intellektuellen Beiträge«. Er schloss eine medizinische Ausbildung ab und begann nach einjähriger klinischer Praxis wieder in der Forschung zu arbeiten, wo er versuchte, seine Arbeit an mRNA-Impfstoffen fortzusetzen. Doch die finanziellen Mittel dafür einzutreiben, erwies sich als schwierig. 1996 etwa bewarb er sich vergebens um Geld für die Entwicklung eines Vakzins gegen saisonale Coronavirus-Infektionen. Schließlich beschloss er, sich auf DNA-Impfstoffe zu konzentrieren.

Ab 2001 war Malone für verschiedene Firmen tätig, unter anderem in beratender Funktion. 2021 fiel er damit auf, öffentlich die Sicherheit jener mRNA-Impfstoffe anzuzweifeln, die er selbst mitentwickelt hatte. So äußert er die Ansicht, die Proteine, die der Organismus infolge der Impfung produziert, könnten Körperzellen schädigen und die Risiken der Vakzine würden bei Kindern und jungen Erwachsenen den medizinischen Nutzen überwiegen. Behauptungen, denen seine Fachkollegen sowie Vertreter von Gesundheitsbehörden entschieden widersprechen.

Vical wiederum schloss 1991 einen millionenschweren Forschungs- und Lizenzvertrag mit dem US-Pharmakonzern Merck, einem der weltweit größten Impfstoffentwickler. Zu jener Zeit versuchte man bei Merck, ein mRNA-basiertes Grippevakzin zu entwickeln, gab das aber bald wieder auf. Denn die Kosten waren zu hoch und die Herstellung zu kompliziert, wie Jeffrey Ulmer schildert, der früher als Wissenschaftler bei Merck gearbeitet hat und

heute verschiedene Unternehmen berät, die in der Impfstoffforschung tätig sind.

Vor ähnlichen Problemen standen die Forscher der kleinen Biotech-Firma Transgène in Straßburg. Zwar hatte dort ein Team um den Molekularbiologen Pierre Meulien 1993 erstmals zeigen können, dass mRNA in Liposomen eine spezifische antivirale Immunreaktion in Mäusen auslösen kann. Die Gruppe ließ ihre Entdeckung sogar patentieren und setzte ihre einschlägigen Arbeiten fort. Doch Meulien, der heute die Innovative Medicines Initiative leitet, eine öffentlich-private Partnerschaft mit Sitz in Brüssel, erkannte später, dass er mindestens 100 Millionen Euro benötigen würde, um die Technologie zu optimieren. Eine derart hohe Summe für ein solch kniffliges, risikoreiches Projekt wollte er seinen Vorgesetzten nicht abringen. Das Patent lief aus, als die Muttergesellschaft von Transgène beschloss, die Gebühren nicht mehr zu zahlen.

Ebenso wie das Merck-Team konzentrierte sich Meuliens Gruppe fortan auf DNA-Impfstoffe und andere vektorbasierte Verabreichungssysteme. Daraus gingen einige zugelassene Vakzine für tiermedizinische Anwendungen hervor, etwa solche, die Infektionen in Fischfarmen eindämmen. Mitte 2021 erteilten indische Behörden eine Notfallzulassung für den ersten DNA-basierten Covid-19-Impfstoff zur Anwendung beim Menschen.

Die Entwicklung von DNA-Impfstoffen kam zwar nur langsam voran – aus Gründen, die noch nicht vollständig verstanden sind. Dennoch sei es von Vorteil gewesen, dass dieses Forschungsgebiet zwischenzeitlich im Fokus stand, betont Ulmer. Von der Herstellung über regulatorische Fragen bis hin zu molekularen Grundlagen und Sequenzdesign: »Vieles von dem, was wir über DNA herausgefunden haben, ließ sich direkt auf RNA-Anwendungen übertragen«, sagt er. »Das hat den Weg geebnet für den Erfolg der RNA-Vakzine.«

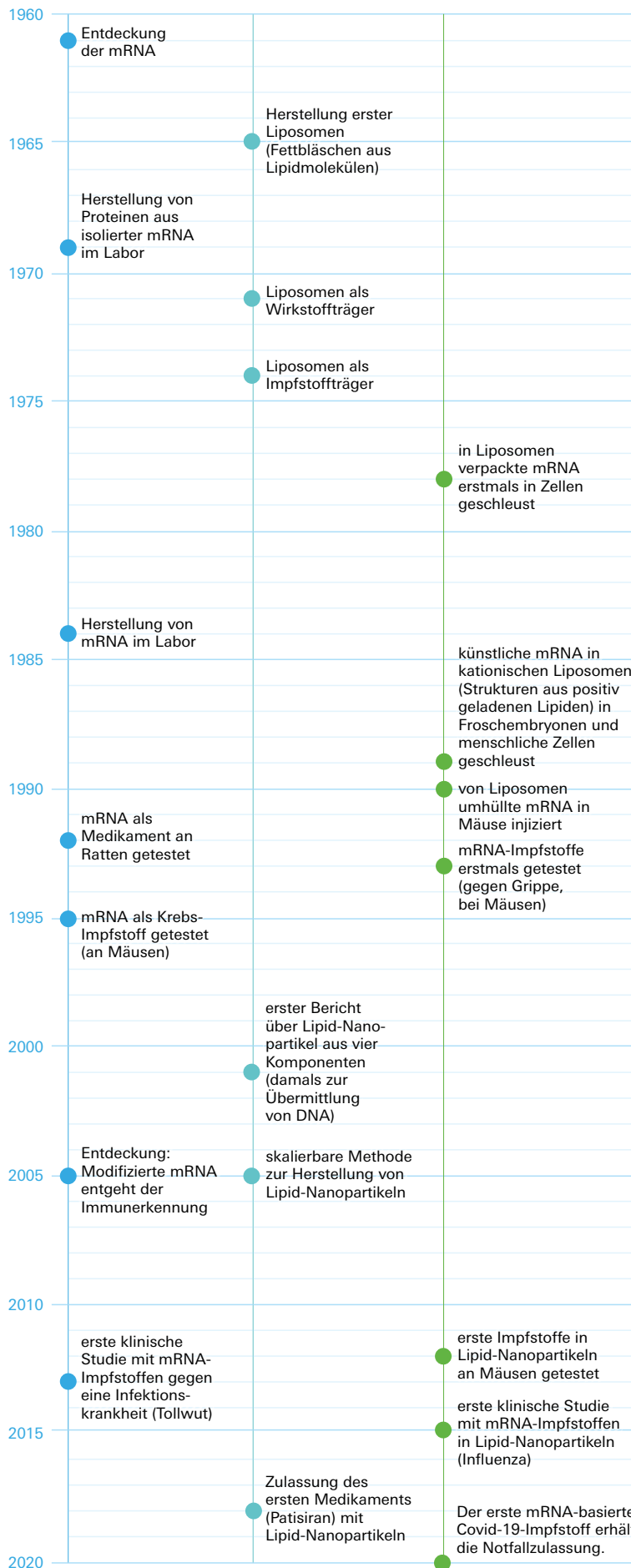
### Beharrliche Vorurteile

Während der 1990er und dem Großteil der 2000er Jahre stellte fast jede Impfstofffirma die Entwicklung von mRNA-Vakzinen zurück und zog dafür andere Projekte vor. Die Ansicht, Boten-RNA sei zu instabil und in der Herstellung zu teuer, hielt sich hartnäckig. »Diesem Vorurteil war kaum beizukommen«, erinnert sich der Virologe Peter Liljeström vom Karolinska-Institut in Stockholm, der vor 30 Jahren Pionierarbeiten auf dem Gebiet leistete.

»Mit RNA ließ sich nur schwer arbeiten«, betont ebenso Matt Winkler, der 1989 in Texas das Unternehmen Ambion gründete, eines der ersten, die auf RNA-Laborbedarf spezialisiert waren. »Wenn Sie mich damals gefragt hätten, ob man einem Menschen RNA als Impfstoff injizieren kann, hätte ich Ihnen den Vogel gezeigt.«

Krebsmediziner standen dieser Idee deutlich aufgeschlossener gegenüber – allerdings hatten sie dabei eher therapeutische Anwendungen im Blick als die Vermeidung von Krankheiten. Gestützt auf Arbeiten des Gentechnikers David Curiel untersuchten mehrere Gruppen an Universitäten und in Start-up-Unternehmen, ob sich mRNA zur Krebsbekämpfung einsetzen ließe. Die Idee dahinter: Codiert Boten-RNA für Proteine, die von entarteten Zellen hergestellt werden, könnte sie das Immunsystem darauf trainieren, Tumoren anzugreifen.





## Geschichte der mRNA-Impfstoffe

Eine lange Abfolge wissenschaftlicher Durchbrüche bereitete den ersten mRNA-Impfstoffen, zugelassen im Jahr 2020, den Weg. Diese Vakzine sind ermöglicht worden durch Innovationen, die den chemischen Aufbau der RNA und ihre Lipidverpackung betreffen.

- mRNA
- lipidbasierte Transportsysteme
- mRNA mit Lipiden (für Impfstoffe)

### Ausgewählte kommerzielle Forschung & Entwicklung

- Gründung des ersten Unternehmens mit mRNA-Fokus (Merix Biosciences, später als Argos, dann als Colmune bekannt)
- Gründung von CureVac
- Gründung von Biontech. Novartis und Shire gründen mRNA-Abteilungen.
- Gründung von Moderna
- DARPA startet Förderung für mRNA-Impfstoffforschung.

MK SPENGER/NATURE. NACH SAHNI, U. ET AL.: mRNA-BASED THERAPEUTICS - DEVELOPING A NEW CLASS OF DRUGS. NATURE REVIEWS DRUG DISCOVERY 13, 2014. UND NACH HOU, X. ET AL.: LIPO NANOPARTICLES FOR mRNA DELIVERY. NATURE REVIEWS MATERIALS, 2021. DOUGIN, E.: THE TANGLED HISTORY OF mRNA VACCINES. NATURE 597, 2021. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Curiel, der heute an der Washington University in St. Louis arbeitet, erzielte mit diesem Ansatz viel versprechende Ergebnisse an Mäusen. Doch als er sich an die Firma Ambion wandte, um zu erörtern, ob sich die Methode vermarkten ließe, lautete die Antwort nur: »Wir sehen kein ökonomisches Potenzial.«

Der Immunologe Eli Gilboa hatte mehr Erfolg. Seine Arbeiten führten 1997 zur Gründung des ersten Unternehmens für mRNA-Therapeutika. Der Forscher schlug vor, Immunzellen aus dem Blut zu filtern und künstliche mRNA in sie einzuschleusen, die für Tumorproteine codiert. Anschließend, so die Theorie, könnten die veränderten Zellen dem Spender wieder injiziert werden und sein Immunsystem dazu bringen, Krebszellen zu attackieren.

Gilboa und seine Kollegen, damals am Medical Center der Duke University in Durham (North Carolina), demonstrierten an Mäusen, dass dieser Ansatz tatsächlich funktioniert. Ende der 1990er Jahre begannen die ersten Versuche mit menschlichen Probanden. Bald führte die von Gilboa ausgegründete Firma Merix Bioscience (später umbenannt in Argos Therapeutics, dann in Colmmune) eigene klinische Studien dazu durch. Bis vor wenigen Jahren sah die Methode aussichtsreich aus, doch dann scheiterte ein Wirkstoffkandidat im Spätstadium einer großen klinischen Studie. Heute wirkt der Ansatz überholt.

Trotzdem hatten Gilboas Arbeiten weit reichende Konsequenzen. Sie inspirierten die Gründer der deutschen Firmen Curevac und Biontech – heute zwei der größten Player auf dem Gebiet der mRNA-Wirkstoffe. Sowohl Ingmar Hoerr bei Curevac als auch Uğur Şahin bei Biontech hatten Ähnliches vor wie Gilboa, freilich mit einer kleinen Abweichung: Sie wollten die mRNA direkt in den Körper verabreichen.

Hoerr hatte damit als Erster Erfolg. Im Jahr 2000, während seiner Zeit an der Universität Tübingen, demonstrierte er, dass das direkte Injizieren von mRNA bei Mäusen eine Immunreaktion hervorrufen kann. Im selben Jahr gründete er Curevac – ebenfalls in Tübingen. Doch nur wenige andere Forscher und Investoren zeigten Interesse. Hoerr erinnert sich an eine Konferenz, auf der er frühe Daten aus seinen Maus-Experimenten präsentierte. »In der ersten Reihe stand ein Nobelpreisträger auf und rief: »Das ist kompletter Mist, den Sie uns hier erzählen – kompletter Mist!« Um welchen Laureaten es sich handelte, verrät Hoerr nicht.

Trotz alledem gelang es ihm schließlich, Forschungsgelder zu akquirieren. Binnen weniger Jahre starteten Versuche mit menschlichen Teilnehmern. Der damalige wissenschaftliche Leiter bei Curevac, Steve Pascolo, war der erste Proband: Er injizierte sich selbst mRNA. Noch heute hat er streichholzkopfgroße weiße Narben am Bein – von der Stanzbiopsie, mit der ein Hautarzt dort Zellen zur Analyse entnahm. Kurz darauf startete eine richtige Studie, um die Wirkung tumorspezifischer mRNA bei Hautkrebspatienten zu untersuchen.

Der Biontech-Chef Uğur Şahin und seine Frau, die Immunologin Özlem Türeci, begannen in den späten 1990er Jahren, über mRNA zu forschen. Mit der Gründung eines Unternehmens warteten sie länger als Hoerr. Viele Jahre arbeiteten sie an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, erwarben Patente, veröffentlichten Fachartikel

und gewannen Forschungsgelder, bevor sie 2007 einigen milliarden schweren Investoren ihren Plan vorlegten. »Wenn es funktioniert, wird es bahnbrechend sein«, sagte Şahin den Geldgebern. Die Antwort waren 150 Millionen Euro Startkapital.

Im gleichen Jahr erhielt ein junges Start-up-Unternehmen namens RNARx die etwas bescheidenere Summe von 97396 US-Dollar (rund 85000 Euro) als Zuschuss von der US-Regierung. Seine Gründer, die Biochemikerin Katalin Karikó und der Immunologe Drew Weissman von der University of Pennsylvania in Philadelphia, hatten gemeinsam eine entscheidende Entdeckung gemacht: Verändert man den genetischen Code einer synthetischen mRNA, hilft ihr das dabei, die angeborene Immunabwehr der Zelle zu umgehen.

### **Chemische Umwandlung verhindert Abwehrreaktion**

In den 1990er Jahren hatte Karikó sich damit abgemüht, aus mRNA einen medizinischen Wirkstoff zu machen. Sie ließ nicht locker, obwohl ihre Finanzierungsanträge immer wieder abgelehnt wurden. 1995, nach diversen Absagen, stellte ihre Universität sie vor die Wahl: Entweder sie müsse gehen oder eine Degradierung samt Gehaltskürzung hinnehmen. Sie entschied sich, zu bleiben und die Arbeit fortzusetzen.

In den Jahren darauf verbesserte sie Malones Verfahren und schaffte es, Zellen dazu zu bringen, ein großes und komplexes Protein mit therapeutischer Bedeutung herzustellen. 1997 begann sie mit Weissman zusammenzuarbeiten, der ein eigenes Team an der University of Pennsylvania



gegründet hatte. Gemeinsam wollten sie einen mRNA-basierten Impfstoff gegen Aids entwickeln. Doch Karikós künstliche Boten-RNA löste massive Entzündungsreaktionen aus, wenn sie Mäusen injiziert wurde.

Bald deckten die beiden Forscher auf, woran das lag. Ihre synthetische mRNA hatte Toll-like-Rezeptoren (TLR) aktiviert – Sensoren des Immunsystems, die Bestandteile von Krankheitserregern erkennen und daraufhin Abwehrreaktionen einleiten. Im Jahr 2005 stellten Karikós und Weissman eine Lösung des Problems vor: Die chemische Umwandlung von Uridin, einem Nukleotid-Baustein der mRNA, in Pseudouridin hielt den Organismus offenbar davon ab, die künstliche mRNA als »feindlich« wahrzunehmen.

Zunächst erkannten nur wenige Forscherinnen und Forscher den therapeutischen Nutzen dieser Entdeckung. Aber das änderte sich bald. Im September 2010 nutzte ein Team um den Stammzellbiologen Derrick Rossi vom Boston Children's Hospital (Massachusetts) chemisch modifizierte mRNA, um Hautzellen zunächst in embryonalähnliche Stammzellen und dann in Muskelgewebe umzuwandeln. Die Arbeit sorgte für großes Aufsehen. Das »Time Magazine« kürte Rossi zu einem der bedeutendsten Menschen des Jahres 2010. Gemeinsam mit Kollegen gründete er das Start-up-Unternehmen Moderna in Cambridge.

Moderna versuchte, jene Patente für modifizierte mRNA zu lizenzieren, welche die University of Pennsylvania im Jahr 2006 angemeldet hatte – gestützt auf Karikós und

**FIRMENGRÜNDER** Der Mediziner Uğur Şahin (rechts) und seine Frau Özlem Türeci gehören zu den führenden Entwicklern von Covid-19-Impfstoffen. Sie haben das Unternehmen Biontech aus der Taufe gehoben.

BIONTECH SE 2021



## »Der wahre Gewinner ist die modifizierte RNA«

Jake Becraft, Mitbegründer und Geschäftsführer von Strand Therapeutics

Weissmans Arbeiten. Doch dafür war es zu spät. Nachdem zwischen der Universität und RNARx keine Lizenzvereinbarung zu Stande gekommen war, hatte sich die Hochschule für eine schnelle Monetarisierung entschieden und die exklusiven Patentrechte im Februar 2010 an einen kleinen Anbieter von Laborreagenzien in Madison vergeben. Die Firma, die heute Cellscript heißt, zahlte damals 300 000 US-Dollar dafür. Ein lohnendes Investment: Später kassierte sie hunderte Millionen Dollar an Unterlizenzgebühren von Moderna und Biontech, den Herstellern der ersten mRNA-Impfstoffe gegen Covid-19. Beide Vakzine enthalten chemisch modifizierte mRNA. RNARx hingegen stellte 2013 den Betrieb ein – etwa zur gleichen Zeit, als Karikós bei Biontech einstieg.

Wie sehr Karikós und Weissmans Entdeckung die Entwicklung der mRNA-Impfstoffe vorangebracht hat, ist unter Forschern umstritten. Zwar nutzte Moderna von Anfang an modifizierte mRNA – der Unternehmensname ist ein Kofferwort aus den beiden Begriffen »modifiziert« und »RNA«. Doch manche Firmen in der Branche verfolgen vollkommen andere Ansätze.

So kamen Wissenschaftler des Pharmaunternehmens Shire aus Lexington, Massachusetts, zu dem Schluss, dass sich unmodifizierte mRNA ebenso erfolgreich einsetzen lässt – vorausgesetzt unter anderem, man entfernt jegliche Verunreinigung aus den Präparaten. »Es kommt auf die Qualität der RNA an«, erklärt Michael Heartlein, ehemaliger Forschungsleiter bei Shire. Er entwickelte die Technik später bei der Firma Translate Bio in Cambridge weiter, der Shire sein mRNA-Portfolio verkaufte.

Daten deuten darauf hin, dass die unmodifizierte mRNA von Translate keine heftige Immunreaktion auslöst und sicher in die Zielzellen hineingelangt. In klinischen Studien muss sich der Ansatz allerdings erst noch beweisen: Der Impfstoffkandidat, den Translate gegen Covid-19 entwickelt hat, befindet sich in der frühen Testphase. Nichtsdestoweniger sieht der französische Pharmariese Sanofi schon jetzt großes Potenzial darin. Im August 2021 gab der Konzern bekannt, Translate für 3,2 Milliarden US-Dollar zu übernehmen.

Curevac entwickelte eine eigene Strategie, um die Immunreaktion gegen mRNA zu dämpfen: Die dortigen Forscher passten die mRNA-Sequenz so lange an, bis die Menge des enthaltenen Uridins ein Minimum erreichte. Der Ansatz schien sich zunächst auszuzahlen; erste Versuche mit experimentellen Impfstoffen gegen Tollwut und Covid-19 verliefen erfolgreich. Mitte 2021 jedoch belegte eine finale Analyse, dass Curevacs Covid-Impfstoffkandidat eine Wirksamkeit von lediglich 48 Prozent hatte und damit deutlich hinter den Erwartungen und der Konkurrenz zu-

rückblieb. Das Unternehmen zog sein Präparat zurück und kündigte an, ein neues Vakzin zu entwickeln.

Nicht zuletzt in Anbetracht dieser Ereignisse sind etliche Experten überzeugt davon, Pseudouridin (die chemisch abgewandelte Form von Uridin) sei für den Erfolg von mRNA-Impfstoffen unerlässlich. Viele sehen die Arbeiten von Karikó und Weissman als entscheidenden Beitrag an, der Würdigung verdiene. »Der wahre Gewinner des Rennens ist die modifizierte RNA«, sagt etwa Jake Becraft, Mitbegründer und Geschäftsführer von Strand Therapeutics, einem in Cambridge ansässigen Unternehmen, das an mRNA-basierten medizinischen Wirkstoffen arbeitet.

Doch es gibt auch andere Stimmen. »Zahlreiche Faktoren wirken sich auf die Sicherheit und Wirksamkeit eines mRNA-Impfstoffs aus – die chemische Veränderung der RNA ist nur einer davon«, erklärt Bo Ying, Geschäftsführer von Suzhou Abogen Biosciences. Das chinesische Unternehmen hat einen Covid-19-Impfstoff auf Basis von unmodifizierter mRNA entwickelt, der sich in der späten klinischen Testphase befindet.

In den Augen vieler Fachleute war eine weitere Innovation ebenso entscheidend für den Erfolg der mRNA-Impfstoffe: die so genannten Lipid-Nanopartikel (LNP), die das künstliche mRNA-Konstrukt schützen und in die Zielzelle schleusen. Die LNP-Technologie stammt ursprünglich aus den Laboren des Biochemikers Pieter Cullis von der University of British Columbia in Vancouver, Kanada. In den späten 1990er Jahren leisteten seine Mitarbeiter an der Universität sowie in einigen kommerziellen Unternehmen, die er gegründet hatte, Pionierarbeiten auf diesem Gebiet. Sie entwickelten LNP, um Nukleinsäuren, die ausgewählte Gens tummschalten, in Zellen einzubringen. Der Wirkstoff Patisiran, der auf jenem Prinzip beruht, ist heute für die Behandlung der Erbkrankheit Amyloidose zugelassen.

### **Eine Fähre, die Boten-RNA befördert**

Nachdem sich der Ansatz, Gene mit Hilfe von RNA stillzulegen (fachsprachlich als »RNA-Interferenz« bezeichnet), in klinischen Versuchen als viel versprechend erwiesen hatte, schwenkten zwei von Cullis' Unternehmen im Jahr 2012 um und fokussierten ihre Forschungsarbeiten auf LNP als Transportsysteme für mRNA-basierte Wirkstoffe. Acuitas Therapeutics in Vancouver beispielsweise kooperierte mit Weissmans Gruppe an der University of Pennsylvania sowie mit mehreren mRNA-Unternehmen, um verschiedene mRNA-LNP-Präparate zu testen. Eines davon ist heute in dem Covid-19-Impfstoff von Biontech zu finden. Die LNP-Mixtur in Modernas Vakzin unterscheidet sich nur wenig davon.

Die Nanopartikel setzen sich aus vier Sorten von Lipidmolekülen zusammen. Drei tragen zur Struktur und Stabilität der Partikel bei. Die vierte, ein so genanntes ionisierbares Lipid, ist der Schlüssel zum klinischen Erfolg der Präparate. Diese Substanz zeigt sich unter Laborbedingungen elektrisch positiv geladen und bietet damit ähnliche Vorteile wie die geladenen Liposomen, die Philip Felgner in den späten 1980ern entwickelt hatte. Jedoch wird sie unter Bedingungen, wie sie etwa im Blutkreislauf vorliegen, elektrisch neutralisiert, was die Lipid-Nanopartikel für den

## **»In der ersten Reihe stand ein Nobelpreisträger auf und rief: »Das ist kompletter Mist, den Sie uns erzählen – kompletter Mist!««**

Ingmar Hoerr, Curevac-Gründer

Organismus verträglicher macht. Außerdem verleiht der Cocktail aus vier verschiedenen Lipidsorten dem Produkt eine längere Haltbarkeit und eine höhere Stabilität im Körper, wie Ian MacLachlan betont, ein früherer Geschäftsführer mehrerer mit Cullis verbundener Unternehmen.

Mitte der 2000er Jahre entwickelten Experten eine neue Methode, um LNP herzustellen und mit ihrer Fracht zu beladen. Dabei mischt ein Apparat namens T-Connector die Lipidmoleküle (gelöst in Alkohol) mit den Nukleinsäuren (gelöst in einem sauren Puffer), und es entstehen daraus dicht gepackte Nanopartikel. Diese Technik erwies sich als zuverlässiger als andere Methoden, um Wirkstoffe auf mRNA-Basis herzustellen.

»Endlich hatten wir ein skalierbares Verfahren«, sagt Andrew Geall, heute Chefentwickler bei der Firma Replicate Bioscience in San Diego. Geall leitete 2012 in Novartis' US-Niederlassung in Cambridge das erste Team, das Lipid-Nanopartikel mit einem RNA-Impfstoff kombinierte. Inzwischen nutzen alle mRNA-Unternehmen ein solches Fertigungssystem in irgendeiner Variante – auch wenn es nach wie vor Streit um die zugehörigen Patente gibt.

Um 2010 herum stiegen mehrere große Pharmaunternehmen in den mRNA-Markt ein. So gründeten Novartis und Shire im Jahr 2008 eigene mRNA-Forschungsabteilungen. Bei Novartis lag der Schwerpunkt (unter Leitung von Geall) auf Impfstoffen, bei Shire (unter Leitung von Heartlein) auf Therapeutika. Im selben Jahr ging Biontech an den Start. Später kamen weitere Start-ups hinzu, finanziert von der US-Behörde DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), die 2012 entschied, die Erforschung von RNA-Impfstoffen und -Medikamenten zu fördern.

Moderna war eines der Unternehmen, die auf diese Förderung aufbauten. Bis 2015 hatte die Firma mehr als eine Milliarde US-Dollar eingeworben – mit dem Versprechen, Körperzellen mittels mRNA dazu zu bringen, bestimmte Proteine herzustellen, und dadurch Krankheiten zu lindern, die durch fehlende oder defekte Eiweiße verursacht werden. Als das nicht so eintrat wie erwünscht, gab Moderna einem weniger ehrgeizigen Ziel den Vorrang: der Produktion von Impfstoffen. Etliche Investoren und Beobachter waren zunächst enttäuscht davon, weil das Vakzin-geschäft weniger lukrativ erschien. Bis Anfang 2020 testete Moderna neun mRNA-Impfstoffe gegen verschiedene Infektionskrankheiten an kleineren Probandengruppen. Keiner von ihnen erwies sich als durchschlagender Erfolg. Nur ein Kandidat schaffte es in die fortgeschrittene klinische Testphase.

Dann rollte die weltweite Covid-19-Pandemie an. Nur wenige Tage, nachdem die Genomsequenz des Virus veröffentlicht worden war, entwickelte Moderna den Prototyp eines Impfstoffs dagegen. In Zusammenarbeit mit dem US-Forschungszentrum NIAID (National Institute of Allergy and Infectious Diseases) gelang es, den Wirkstoffkandidaten in weniger als zehn Wochen an Mäusen zu testen und erste Versuche mit menschlichen Teilnehmern zu starten. Auch bei Biontech liefen die Drähte heiß. Im März 2020 schloss das Unternehmen eine Partnerschaft mit dem New Yorker Pharmakonzern Pfizer. Die Impfstoffstudien schritten im Rekordtempo voran: Von den ersten klinischen Tests bis zur Notfallzulassung in den USA vergingen weniger als acht Monate.

Die Vakzine von Biontech und Moderna basieren auf modifizierter mRNA, umhüllt von LNP. Beide enthalten Nukleotidsequenzen, die für das Sars-CoV-2-Stachelprotein codieren und so ausgelegt sind, dass das Eiweiß die Konformation einnimmt, welche es beim Verschmelzen mit menschlichen Zellen innehat. In dieser zielgerichteten Anpassung der Proteinstruktur – vorgenommen vom Impfspezialisten Barney Graham sowie den Strukturbiologen Jason McLellan und Andrew Ward – sehen viele Experten eine weitere preiswürdige Leistung, obgleich sie nicht spezifisch für RNA-Impfstoffe ist, sondern sich ebenso auf andere Vakzine anwenden lässt.

### Schwieriger Patentschutz

Die Debatte, wer am meisten zur Entwicklung der mRNA-Impfstoffe beigetragen hat, hängt mit der Frage zusammen, wer am Ende die lukrativen Patente halten wird. Ein Großteil des einschlägigen geistigen Eigentums geht auf die Arbeiten von Felgner, Malone und ihren Kollegen bei Vical im Jahr 1989 zurück sowie auf die Beiträge von Liljeström im Jahr 1990. Die damit zusammenhängenden Patente hatten aber lediglich eine Laufzeit von 17 Jahren, was längst verstrichen ist. Selbst die 2006 angemeldeten Patente auf die Entdeckungen Karikós und Weissmans werden in den kommenden Jahren auslaufen. Zwar können Unternehmen sich spezielle mRNA-Sequenzen schützen lassen, etwa für eine Variante des Spike-Proteins, oder auch ausgewählte Lipidmixturen. Branchenkenner glauben allerdings, dass es bald schwierig sein wird, breit angelegte Patente auf mRNA-Lipid-Nanopartikel zu bekommen.

Natürlich versuchen es die Unternehmen trotzdem. Moderna testet derzeit mRNA-Impfstoffe gegen Influenza, Zytomegalie und weitere Infektionskrankheiten in klinischen Studien. 2020 erwarb die Firma zwei Patente, die zahlreiche Anwendungen von mRNA zur Beeinflussung der zellulären Proteinproduktion abdecken. Insider haben jedoch gegenüber »Nature« erklärt, diese Schutzrechte könnten anfechtbar sein. »Wir glauben nicht, dass sie sich im Streitfall durchsetzen lassen«, sagt Eric Marcusson, wissenschaftlicher Leiter bei Providence Therapeutics, einem Unternehmen für mRNA-Vakzine im kanadischen Calgary.

Auf die Frage, wer einen Nobelpreis für die Entwicklung der mRNA-Impfstoffe verdiene, fallen am häufigsten die Namen Karikó und Weissman. Die beiden sind schon

mehrfach geehrt worden, unter anderem mit dem Breakthrough Prize (mit drei Millionen US-Dollar die höchstdotierte Auszeichnung in der Wissenschaft) sowie dem angesehenen Prinzessin-von-Asturien-Preis in der Sparte Forschung und Technik. Letztere Auszeichnung ging ebenso an Felgner, Şahin, Türeci und Rossi sowie an Sarah Gilbert, die Experte hinter dem vektorbasierten Covid-19-Impfstoff der University of Oxford und der Firma AstraZeneca.

Manche sind der Ansicht, Karikó solle nicht nur für ihre mRNA-Forschung gewürdigt werden, sondern außerdem dafür, wie sie die wissenschaftliche Gemeinschaft stärke. »Sie ist mehr als eine tolle Wissenschaftlerin, sie ist schlicht eine Autorität auf ihrem Gebiet«, sagt Anna Blakney, RNA-Bioingenieurin an der University of British Columbia. Blakney rechnet es Karikó hoch an, dass sie es ihr 2019, als Blakney Junior-Postdoc war, ermöglichte, auf einer großen Konferenz vorzutragen. Karikó versuche stets, »aktiv andere Menschen zu fördern, obwohl sie selbst während ihrer gesamten Laufbahn viel zu wenig Anerkennung bekommen hat«.

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/impfen](https://www.spektrum.de/t/impfen)



ISTOCK / JURGAR

Doch wissenschaftliche Durchbrüche sind heute nicht mehr die Leistungen Einzelner. Cullis beispielsweise betont, die LNP-Technologie aus seinen Laboren sei eine kollektive Errungenschaft: »Wir sprechen hier von hundert, wahrscheinlich tausenden Menschen, die gemeinsam daran gearbeitet haben.« In die gleiche Kerbe schlägt Karikó: »Jeder hat seinen Teil dazu beigetragen, Stück für Stück – darunter auch ich.« Rückblickend freuen sich viele einfach darüber, dass mRNA-Impfstoffe heute zahllose Leben retten und sie selbst einen Anteil daran haben. »Es ist großartig für mich, das zu sehen«, sagt Felgner. »All die Dinge, die wir uns einst erhofft hatten, geschehen nun wirklich.« ◀

### QUELLEN

**Karikó, K. et al.:** mRNA is an endogenous ligand for Toll-like receptor 3. *The Journal of Biological Chemistry* 279, 2004

**Krieg, P.A., Melton, D.A.:** Functional messenger RNAs are produced by SP6 in vitro transcription of cloned cDNAs. *Nucleic Acids Research* 12, 1984

**Malone, R.W. et al.:** Cationic liposome-mediated RNA transfection. *PNAS* 86, 1989

### nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](https://www.nature.com)  
Nature 597, S. 318–324, 2021

# AUTOIMMUNKRANKHEITEN RISIKOFAKTOR: WEIBLICH

**Mehr als drei Viertel der von Autoimmunerkrankungen Betroffenen sind Frauen. Woran liegt das?**



**Melinda Wenner Moyer** ist Wissenschaftsjournalistin und schreibt regelmäßig unter anderem für »Scientific American«, »New York Times« und »Washington Post«. Sie lebt in der Region Hudson Valley im US-Bundesstaat New York.

» [spektrum.de/artikel/1974541](https://spektrum.de/artikel/1974541)

Die Leidensgeschichte von Melanie See begann 2005. Plötzlich fing sie an, stark zu schwitzen. Rasch nahm sie fünf Kilogramm ab. Ihr wurde schwindlig, wenn sie vom Bett zur Couch im Wohnzimmer ging. Ihre Brüste produzierten Milch, obwohl sie keinen Säugling stillte. Nach einer Reihe von Laboruntersuchungen stellte sich heraus: Die damals 45-Jährige hatte Morbus Basedow, eine Autoimmunerkrankung, bei der die Schilddrüse zu viel Hormone produziert.

Drei Jahre später – die Symptome ihrer Basedow-Krankheit hatte man mittlerweile medikamentös im Griff – verschlechterte sich ihr Gesundheitszustand abermals rapide. Sie verlor erneut an Gewicht und fühlte sich extrem schwach. Die Ärzte diagnostizierten Zöliakie, eine weitere Autoimmunerkrankung, die von glutenhaltigen Lebensmitteln ausgelöst wird. Doch damit nicht genug, denn 2015 klagte See über neu aufgetretene starke Verdauungsstörungen und Muskelschmerzen. Ihre Ärzte in Chapel Hill waren nun ratlos und stellten unterschiedlichste Diagnosen. »Vaskulitis, Lupus, ich weiß gar nicht mehr, was noch alles«, erzählt See. »Jedenfalls stimmte etwas nicht mit mir. Meine Blutwerte und das, was aus der Muskelbiopsie vom Juni 2016 herauskam, passten in keine Schublade.« Nach vielen weiteren Untersuchungen wurde eine dritte Autoimmunkrankheit diagnostiziert: die seltene Mischkollagenose, die in einigen Merkmalen dem Lupus erythematoses ähnelt.

Mit einem Anteil von schätzungsweise 78 Prozent sind Frauen im Vergleich zu Männern auffallend oft von Autoimmunerkrankungen betroffen (siehe »Spektrum« Februar 2022, S. 19). Neben den Krankheiten, die bei Melanie See diagnostiziert wurden, gehören dazu multiple Sklerose (MS), rheumatoide Arthritis, Hashimoto-Thyreoiditis sowie weitere Leiden, bei denen das Immunsystem fälschlicherweise gesunde Zellen und Gewebe des Körpers angreift (siehe »Spektrum« Februar 2022, S. 12). Autoimmunkrankheiten gelten heute als fünfthäufigste Todesursache bei Frauen unter 65 Jahren.

»Wir müssen den biologischen Ursachen dieser Häufung bei Frauen auf den Grund gehen«, fordert die Immunologin Shannon Dunn von der kanadischen University of Toronto. »Dann verstehen wir nicht nur besser, wie Autoimmunkrankheiten entstehen – was uns wiederum neue Ansätze für Prävention und Therapie eröffnet. Sondern wir können womöglich auch die geschlechtlich unterschiedlichen Reaktionen auf Infektionen, Impfungen und Verletzungen sowie bei Krebserkrankungen aufklären.«

Dabei ist das drastische Ungleichgewicht in der Verteilung von Autoimmunerkrankungen keine neue Beobachtung. Als Ärzte solche Störungen vor mehr als einem Jahrhundert erstmals beschrieben, fiel ihnen bereits auf, dass es Frauen viel häufiger trifft als Männer. Damals neigten die Mediziner allerdings dazu, die einzelnen Auto-

A close-up photograph showing a person's hands scratching their skin. The hands are positioned over a patch of skin, with fingers curled and nails digging into the flesh. The skin appears slightly red and irritated. The background is blurred, focusing attention on the action of scratching.

SERIE

**Der Feind im eigenen Körper**

Teil 1: Februar 2022

**Angriff von innen**

Stephani Sutherland

**Daten und Fakten**

Maddie Bender, Jen Christiansen, Miriam Quick

Teil 2: März 2022

**Risikofaktor: Weiblich**

Melinda Wenner Moyer

Teil 3: April 2022

**Wider die Selbsterstörung**

Marla Broadfoot

**QUÄLENDES JUCKEN**  
Mit Hautausschlägen oder  
Juckreiz beginnen etliche  
Autoimmunkrankheiten. Oft  
trifft es Frauen.

immunkrankheiten als eigenständige Syndrome mit jeweils spezifischen Ursachen zu betrachten. Sie ahnten nicht, dass diese anscheinend so unterschiedlichen Leiden grundlegend biologische Gemeinsamkeiten teilen.

Als jedoch die Forscherinnen und Forscher begannen, die Erkrankungen als Gruppe zu betrachten, fielen ihnen interessante Muster ins Auge. So korreliert der Krankheitsbeginn bei Frauen oft mit wichtigen physiologischen Übergangsprozessen. Lupus und multiple Sklerose beispielsweise manifestieren sich in der Regel erstmals im gebärfähigen Alter. Andere Autoimmunkrankheiten wie die rheumatoide Arthritis treten meist nach der Menopause auf. Während der Schwangerschaft kann sich die Symptomatik erheblich verändern: Bei Patientinnen mit rheumatoider Arthritis, multipler Sklerose oder Morbus Basedow gehen die Beschwerden dann meist zurück, während sie sich bei Lupus in dieser Zeit oft noch verschlimmern.

Was haben diese Übergangsphasen – Pubertät, Schwangerschaft, Wechseljahre – gemeinsam? Bei allen verändert sich erheblich die Produktion der Hormone Östrogen, Progesteron und Testosteron. So steigt der Östrogenspiegel in der Pubertät und der Schwangerschaft deutlich an. Inzwischen gilt nach Ansicht der Immunologin DeLisa Fairweather von der Mayo Clinic in Jacksonville (USA) als sicher, dass zumindest etliche Autoimmunkrankheiten durch Östrogen gesteuert werden. Tatsächlich scheinen orale Verhütungsmittel sowie Hormonersatztherapien mittels Östrogenen das Lupusrisiko zu erhöhen.

Wie die anderen Sexualhormone beeinflusst Östrogen unmittelbar die Aktivität von Erbfaktoren, die Immunfunktionen regulieren. Es schaltet beispielsweise das Gen für Interferon- $\gamma$  ein – eine Signalsubstanz, welche die Abwehr gegen Krankheitserreger steuert, aber ebenso Autoimmunreaktionen verstärken kann. Östrogen aktiviert zudem B-Zellen des Immunsystems, die wiederum Antikörper produzieren, um damit körperfremde Strukturen zu markieren und zu attackieren. So genannte Autoantikörper können jedoch auch körpereigene Zellen angreifen.

Hormone, die eine Schlüsselrolle in der Schwangerschaft spielen, wie etwa Progesteron wirken sich ebenfalls dramatisch auf das Immunsystem aus. Viele wichtige Immunzellen, darunter T-Zellen und Makrophagen, tragen auf ihrer Oberfläche Bindungsstellen für Progesteron. Dockt das Hormon daran an, verschiebt es die Balance des Immunsystems, das dann verstärkt Antikörper und damit auch Autoantikörper produziert. Wegen der Beteiligung von T-Helferzellen des Typs 2 firmiert dieser Prozess unter den Namen  $T_{H2}$ -Immunreaktion. Im Gegensatz dazu hält die  $T_{H1}$ -Immunreaktion den Organismus von der Antikörperproduktion ab und aktiviert stattdessen Immunzellen, die andere Körperzellen direkt angreifen.

Der Anstieg des Progesteronspiegels könnte erklären, weshalb die Symptome von rheumatoider Arthritis und multipler Sklerose während der Schwangerschaft oft zurückgehen: Diese Krankheiten beruhen nicht auf  $T_{H2}$ , sondern auf  $T_{H1}$ -Immunreaktionen, die durch Progesteron gedämpft werden. »Bei MS-Patientinnen erhöht sich jedoch kurz nach der Entbindung das Risiko für einen Krankheits Schub«, erläutert die Neurologin Tanuja Chitnis vom Brigham and Women's Hospital in Boston. »Das hängt mit dem dramatischen Umschwung der Hormonlage zusammen.«

### **Geschlechtshormone beeinflussen die Aktivität von Schlüsselgenen des Immunsystems**

Testosteron, das Frauen in viel geringerem Maß als Männer produzieren, stellt einen weiteren Mitspieler bei Autoimmunerkrankungen dar. Auf der Oberfläche von B- und T-Zellen sitzen Testosteronrezeptoren, und das Hormon wirkt weitgehend immunsuppressiv. Es unterdrückt Immunzellen einschließlich neutrophiler Granulozyten, natürlicher Killerzellen und Makrophagen – was erklären könnte, weshalb Männer tendenziell seltener von Autoimmunkrankheiten betroffen sind. Wie Studien ergaben, weisen MS-Patienten häufig niedrige Testosteronspiegel auf. Entsprechend zeigen Männer mit Hypogonadismus, deren Hoden wenig Testosteron produzieren, ein erhöhtes Risiko für Lupus erythematodes und rheumatoide Arthritis.

All diese Sexualhormone beeinflussen gleichfalls die Aktivität von Schlüsselgenen des Immunsystems. Ein Konsortium aus finnischen und deutschen Wissenschaftlern entdeckte 1997 ein Gen, das eine entscheidende Rolle bei Autoimmunerkrankungen spielt. Dieser Erbfaktor namens *AIRE* (für AutoImmun-REgulator) wird im Thymus aktiv, wo Vorläuferzellen zu T-Zellen heranreifen. Das entsprechende *AIRE*-Protein sorgt dafür, dass die heranreifenden T-Zellen wichtige körpereigene Eiweißstoffe kennen lernen und sie von womöglich gefährlichen Fremdproteinen unterscheiden. Auch werden dank *AIRE* fehlgesteuerte T-Zellen, die körpereigene Proteine angreifen, noch im Thymus vernichtet – bevor sie im Organismus Schaden anrichten können. Es überrascht daher nicht, dass Menschen mit einem mutierten *AIRE*-Gen mit größerer Wahrscheinlichkeit bestimmte Autoimmunerkrankungen entwickeln.

Wie sich herausstellte, wirken Sexualhormone an der Regulation der Aktivität von *AIRE* und ähnlichen Erbfaktoren mit. 2016 fanden Forscherinnen und Forscher der Pariser Sorbonne bei Mäusen heraus, dass Östrogen und Pro-

## **AUF EINEN BLICK DER FLUCH DES X-CHROMOSOMS**

- 1** Mit einem Anteil von fast 80 Prozent sind auffallend viele Patienten von Autoimmunerkrankungen weiblich. Manche Frauen sind sogar von mehreren Leiden gleichzeitig betroffen.
- 2** Geschlechtshormone beeinflussen Immunreaktionen. Unterschiedliche Genaktivitäten auf dem weiblichen X-Chromosom sowie die Zusammensetzung der Darmflora werden ebenfalls als auslösende Faktoren diskutiert.
- 3** Eventuell liegt im höheren Frauenanteil ein evolutionäres Erbe, da der weibliche Organismus während der Schwangerschaft das Immunsystem streng kontrollieren muss, um den Fötus nicht abzustoßen.



gesteron das *AIRE*-Gen hemmen und damit die Produktion des entsprechenden Proteins drosseln, während Testosteron sie ankurbelt. Wie das Team weiter beobachtete, bilden Frauen nach der Pubertät – vermutlich bedingt durch die Geschlechtshormone – weniger AIRE-Protein als Männer. Das bedeutet wiederum, dass mehr autoreaktive T-Zellen aus dem Thymus entkommen und Autoimmunerkrankungen verursachen können.

Doch trotz ihrer offenbar wichtigen Rolle können Sexualhormone nicht alles erklären. Denn manche Leiden wie Lupus oder MS brechen mitunter bereits in der Kindheit aus – also bevor die Spiegel von Östrogen und Progesteron in der Pubertät ansteigen. Es müssen demnach weitere Faktoren beteiligt sein. Einige Forscher konzentrieren sich daher auf den augenfälligsten zellulären Unterschied zwischen Mann und Frau: das zweite X-Chromosom.

Laut Lehrbuchwissen besitzen Frauen zwei X-Chromosomen, von denen jedoch jeweils eines in jeder Zelle sehr früh während der Embryonalentwicklung abgeschaltet wird – ein Prozess, der als X-Inaktivierung bekannt ist. Das stillgelegte X-Chromosom kondensiert sich zu einer eng gepackten Struktur, die in jeder Zelle als so genanntes Barr-Körperchen eingelagert bleibt. Diese Abschaltung verhindert, dass zu viel X-chromosomale Proteine produziert werden.

In den letzten Jahren offenbarte sich allerdings, dass die X-Inaktivierung nicht ganz so vollständig abläuft wie zunächst vermutet. Laut Studien bleiben mindestens 15 Prozent der Gene auf dem vermeintlich stillgelegten X-Chromosom weiterhin aktiv; damit können diese Erbfaktoren bei Frauen für doppelt so viel Protein sorgen wie bei Männern. So werden bei Lupuspatientinnen ganz bestimmte Gene auf beiden X-Kopien abgelesen, was mit dem Schweregrad der Erkrankung korreliert: Je mehr von diesen aktiven X-chromosomalen Genen vorliegen, desto schlimmer sind die Symptome.

Tatsächlich lassen sich viele X-chromosomale Gene direkt mit Autoimmunerkrankheiten in Verbindung bringen. Eines davon, das Gen *TLR7* (Toll-like receptor 7), produziert das gleichnamige Protein, das bei Autoimmunerkrankheiten wie Lupus erythematoses, Polymyositis, systemischer Sklerose und Sjögren-Syndrom eine Rolle spielt. TLR-7 hat die Aufgabe, Krankheitserreger an einfachen Mustern zu erkennen und Immunzellen auf sie aufmerksam zu machen. Zudem erhöht es die Produktion von entzündungsfördernden Signalsubstanzen, den Interferonen, welche die Autoimmunreaktion verstärken können.

Ein weiteres Gen, das bei Frauen häufig auf vermeintlich abgeschalteten X-Chromosomen aktiviert wird, heißt *TASL* (TLR adaptor interacting with endolysosomal SLC15A4). Es steigere die weibliche Interferonproduktion auf mindestens das Doppelte, erläutert der Mediziner Hal Scofield von der University of Oklahoma, der die Rolle der X-Inaktivierung bei Autoimmunerkrankheiten erforscht.

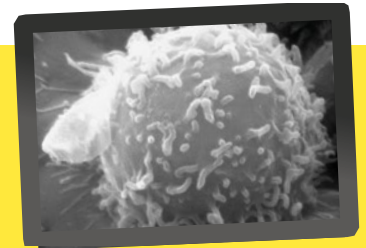
Eine 2019 entdeckte Kuriosität bei der X-Inaktivierung spricht ebenfalls für deren Beteiligung an der Autoimmunität. Das Team um die Biomedizinerin Montserrat Anguera von der University of Pennsylvania hatte die Reifung junger T- und B-Zellen in weiblichen Mäusen untersucht. Wie sich dabei zeigte, wird bei diesen Zellen das zweite X-Chromo-

som nicht komplett stillgelegt, vielmehr ändert sich sein Zustand dynamisch. Dessen Gene können also relativ leicht aktiviert werden, obwohl sie eigentlich ausgeschaltet bleiben sollten – eine »verrückte Entdeckung«, wie Anguera meint.

Dass sich weibliche Immunzellen bei der X-Inaktivierung anders verhalten als die übrigen Körperzellen und damit das Risiko für Autoimmunerkrankungen steigern, war völlig unerwartet. Doch wie Angueras Team 2021 bestätigte, umgehen B-Zellen von Mädchen und Frauen mit Lupus erythematoses die normalen Mechanismen der X-Inaktivierung, was bei den Zellen wahrscheinlich dazu führt, dass sie mehr X-chromosomales Protein bilden, als sie eigentlich sollten.

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/das-immunsystem](https://spektrum.de/t/das-immunsystem)



TIMOTHY TRICHE, NATIONAL CANCER INSTITUTE, 1976

Menschen mit einer abweichenden Anzahl von X-Chromosomen liefern ebenfalls Hinweise auf die Rolle der Geschlechtschromosomen bei Autoimmunerkrankungen: Männer mit dem Klinefelter-Syndrom, die neben ihrem Y-zwei X-Chromosomen besitzen, haben ein 14-fach höheres Lupusrisiko als Männer mit normalem Chromosomensatz. Entsprechend steigt bei Frauen mit drei X-Chromosomen die Wahrscheinlichkeit, an Lupus oder dem Sjögren-Syndrom zu erkranken, um den Faktor 2,5 beziehungsweise 2,9.

Weshalb laufen im weiblichen Organismus solche Mechanismen ab, wenn sie doch das Krankheitsrisiko erhöhen? Normalerweise eliminiert die Evolution im Lauf der Zeit Merkmale, die es der betreffenden Spezies erschweren, sich erfolgreich fortzupflanzen – und die X-chromosomale Autoimmunität steht dem eindeutig im Weg. Dieser Widerspruch lässt Evolutionsbiologen vermuten, dass das Phänomen auch einen wichtigen Vorteil aufweisen sollte.

### Toleranz bei der Schwangerschaft

2019 stellte das Team um die Evolutionsbiologin Melissa Wilson von der Arizona State University die Hypothese der Schwangerschaftskompensation auf: Die Plazenta, die den Fötus mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt, entwickelte sich in der Stammesgeschichte der Säugetiere zu der Zeit, als auch die Geschlechtschromosomen entstanden; gleichzeitig traten zahlreiche zusätzliche Gene auf dem X-Chromosom auf. Diese drei Entwicklungen könnten demnach miteinander zusammenhängen. Während der Schwangerschaft wird der weibliche Organismus mit einem wachsenden Fötus konfrontiert, dessen DNA zur Hälfte vom Vater stammt und damit fremd ist. Die fötalen Zellen sollte daher das mütterliche Immunsystem eigentlich angreifen – was aber nicht geschieht. Des Weiteren toleriert die Mutter die vom Fötus gebildete und in den Uterus einwachsende Plazenta. Wie Wilson nun vermutet, haben sich die X-chromosomalen

Gene und die unvollständige X-Inaktivierung so entwickelt, dass der weibliche Organismus auf die vorübergehenden immunologischen Herausforderungen flexibel reagieren kann. Entsprechend verändert sich die Immunlage während der Schwangerschaft dynamisch: Zu Beginn nehmen bestimmte Immunreaktionen zu, was der Plazenta hilft, neue Blutgefäße zu bilden. Etwa in der Mitte der Schwangerschaft lassen Immunität und Entzündungsreaktionen nach, um sich dann in Vorbereitung auf Wehen und Geburt wieder zu verstärken.

Andere Beobachtungen bestätigen die Vorhersagen der Hypothese zur Schwangerschaftskompensation. So bekommen Frauen heute im Vergleich zu vorherigen Jahrhunderten viel weniger Kinder – das weibliche Immunsystem wird also auch nicht mehr so oft supprimiert. Das könnte erklären, warum die Rate von Autoimmunerkrankheiten bei Frauen heute zunimmt, während sie in der Vergangenheit weniger häufig auftraten. Wenngleich eine endgültige Bestätigung dieser Hypothese noch aussteht, hält es Wilson für möglich, dass »Plazentabildung und Schwangerschaft für die Entwicklung des weiblichen Immunsystems entscheidend sind – was wiederum ein Grund für die geschlechtsspezifischen Unterschiede bei Autoimmunerkrankheiten sein könnte«. Mit anderen Worten: Die Autoimmunität könnte ein unerwünschter Nebeneffekt der komplexen Immunprozesse sein, auf die der weibliche Organismus angewiesen ist, um Kinder auf die Welt zu bringen.

Doch längst nicht alle Immunphänomene lassen sich genetisch erklären. So kann ein eineiiger Zwilling eine Autoimmunerkrankung entwickeln, während der andere – mit praktisch identischem Genom – gesund bleibt. Die Umwelt hat hier also ein entscheidendes Wörtchen mitzureden.

Die Immunologin Jayne Danska von der University of Toronto verbrachte einen Großteil ihrer wissenschaftlichen Laufbahn damit, die Beziehung zwischen dem Geschlecht und der Genetik von Autoimmunerkrankungen zu ergründen. Sie wollte wissen, inwieweit sich Risikogene bei Männern und Frauen unterschiedlich auswirken. 2012 machte sie jedoch eine zufällige Entdeckung, die ihre Arbeit in eine neue Richtung lenken sollte. »Es gehört zu den Weisheiten der Wissenschaft, dass die besten Entdeckungen diejenigen sind, nach denen man gar nicht gesucht hat«, kommentiert sie.

Danska und ihr Team fahndeten nach Risikogenen für die Autoimmunerkrankung Diabetes mellitus Typ 1, bei der das Immunsystem die Insulin produzierenden  $\beta$ -Zellen in der Bauchspeicheldrüse angreift. Die Forscher experimentierten mit einer im Labor gezüchteten Mauslinie, den so genannten NOD-Mäusen (non-obese diabetic mice). Diese Tiere eignen sich als Modell für die Krankheit – mit einer wichtigen Ausnahme: Typ-1-Diabetes gilt als eine der wenigen Autoimmunerkrankheiten, die nicht gehäuft Frauen trifft – weibliche NOD-Mäuse hingegen tragen ein doppelt so hohes Erkrankungsrisiko wie ihre männlichen Artgenossen.

Danska wusste, dass sich Umweltfaktoren und Gene manchmal gegenseitig beeinflussen, und sie hatte sich bereits mit Darmbakterien als Risikofaktor beschäftigt.

Folglich fragte sie sich, ob Unterschiede im Mikrobiom mit dem erhöhten Diabetesrisiko der weiblichen Tiere zusammenhängen könnten. Das Team zog daher eine Gruppe NOD-Mäuse in einer Umgebung auf, die völlig frei von Bakterien und Viren war, also auch der üblichen Keime, die normalerweise den Darm besiedeln.

Dabei machte Danska die erste überraschende Beobachtung: Die keimfrei gehaltenen Tiere beider Geschlechter entwickelten gleich häufig einen Diabetes. »Der Geschlechtsunterschied verschwand völlig«, erinnert sie sich. »Mit diesem Ergebnis hatten wir überhaupt nicht gerechnet. Ich konnte es kaum glauben.«

Doch die Wiederholung des Experiments führte zum gleichen Befund, und weitere Untersuchungen brachten neue Überraschungen: Die Forscher transplantierten die Darmflora erwachsener männlicher NOD-Mäuse in junge weibliche Tiere, die noch keinen Diabetes entwickelt hatten – und daraufhin zu gesunden Mäusen ohne Zuckerkrankheit heranwuchsen.

Danskas 2013 publizierte Forschungsergebnisse lieferten den ersten Hinweis darauf, dass »die Darmmikroben die Autoimmunität beim weiblichen Geschlecht beeinflussen können«, erläutert der Rheumatologe Martin Kriegel von der Universität Münster. Dies stelle eine wichtige Erkenntnis dar, deren Hintergründe noch unbekannt seien.

### **Die Darmflora von Männern erhöht den Testosteronspiegel**

Bislang weiß niemand, weshalb das männliche Darmmikrobiom protektiv wirken sollte. Danska und ihr Team stießen jedoch auf Hinweise darauf, dass Testosteron eine wichtige Rolle spielt: Die zu Diabetes neigenden, keimfrei aufgezogenen NOD-Mäusemännchen wiesen im Blut niedrigere Testosteronspiegel auf als Männchen mit normaler Darmflora. Und weibliche NOD-Nager, die mit Darmbakterien von männlichen Artgenossen vor der Erkrankung geschützt waren, zeigten höhere Testosteronwerte als Weibchen mit normal besiedeltem Darm.

All das deutet darauf hin, dass das Mikrobiom der Männchen den Testosteronspiegel erhöht und vorbeugend gegen Diabetes mellitus wirkt. Als Danska und ihre Kollegen die Darmflora männlicher Mäuse in Weibchen transplantierten und dann die Übertragung von Testosteronsignalen blockierten, stieg die Diabeteshäufigkeit wieder an.

Diese Beobachtungen decken sich mit Forschungsergebnissen zum Lupus erythematoses bei Männern: Wird das Testosteron blockiert, steigt das Erkrankungsrisiko. Parallelen zeigen sich auch bei Untersuchungen an einem Mausstamm, dessen weibliche Tiere besonders anfällig für Lupus sind. Wird die Darmflora der Weibchen mit Antibiotika stark ausgedünnt, sinkt das Erkrankungsrisiko, berichteten Wissenschaftler der University of South Carolina 2020.

Unklar ist bislang, wie das Darmmikrobiom den Testosteronspiegel regulieren könnte oder umgekehrt. Danskas Forschungsergebnisse sprechen dafür, dass sich die Zusammensetzung des Mikrobioms bei männlichen und weiblichen Mäusen während der Geschlechtsreife zu unterscheiden beginnt. Das könnte sogar erklären, weshalb es bei Menschen kaum geschlechtsbedingte Unterschiede in der

Häufigkeit von Typ-1-Diabetes gibt: Die Krankheit bricht in der Regel vor der Pubertät aus, also bevor eine geschlechtsspezifisch unterschiedliche Darmflora das Risiko beeinflussen könnte. Möglicherweise werde das Mikrobiom durch den plötzlichen Zustrom von Sexualhormonen in der Pubertät modifiziert; mit ziemlicher Sicherheit jedoch geschehe das wechselseitig, meint Kriegel: Die Darmflora reagiere auf die Sexualhormone und diese wiederum auf die Mikroben.

Mäuse sind natürlich keine Menschen. Danska ist dennoch davon überzeugt, dass ihre Forschungsergebnisse große Bedeutung für Autoimmunerkrankungen haben, die Frauen häufiger treffen. Möglicherweise wirken sich bestimmte Darmbakterien entscheidend auf die Autoimmunität aus. Wenn dem so ist, könnten Eingriffe in die Zusammensetzung des Mikrobioms solche Krankheiten verhindern.

Danska und Kriegel hoffen, mikrobiombasierte Therapien für Frauen mit hohem Risiko für Autoimmunerkrankungen entwickeln zu können – also das Mikrobiom so zu verändern, dass es besser schützt. Andere Forscher versuchen die Signalübertragung von Sexualhormonen zu beeinflussen, um das Risiko zu senken. Je mehr man über die Gründe für die erhöhte Anfälligkeit von Frauen lernt, desto mehr Möglichkeiten eröffnen sich, Autoimmunerkrankungen vorzubeugen.

Angesichts der Tatsache, dass X-Chromosomen, weibliche Geschlechtshormone und ein geschlechtsspezifisches Mikrobiom Risikofaktoren für Autoimmunerkrankungen zu

sein scheinen, könnte man mutmaßen, die Biologie hätte sich gegen das weibliche Geschlecht verschworen. Die Bürde der Autoimmunität kann allerdings auch als ein Ausdruck der Bedeutung von Frauen für das Überleben unserer Spezies betrachtet werden. »Schließlich müssen Frauen aus immunologischer Sicht absolut Bemerkenswertes leisten, was von Männern schlicht und einfach nicht verlangt wird«, erläutert Danska. Autoimmunität mag der Preis sein, den Frauen für ihre physiologischen Höchstleistungen zahlen – doch es besteht Hoffnung, dass ihnen die Wissenschaft diese Bürde irgendwann abnehmen kann. ◀

#### QUELLEN

**Dragin N. et al.:** Estrogen-mediated downregulation of AIRE influences sexual dimorphism in autoimmune diseases. *Journal of Clinical Investigation* 126, 2016

**Markle, J. G. M. et al.:** Sex differences in the gut microbiome drive hormone-dependent regulation of autoimmunity. *Science* 339, 2013

**Natri, H. et al.:** The pregnancy pickle: Evolved immune compensation due to pregnancy underlies sex differences in human diseases. *Trends in Genetics* 35, 2019

**Pyfrom, S. et al.:** The dynamic epigenetic regulation of the inactive X chromosome in healthy human B cells is dysregulated in lupus patients. *PNAS* 118, 2021

**Syrett, C. M. et al.:** Altered X-chromosome inactivation in T cells may promote sex-biased autoimmune diseases. *JCI Insight* 4, 2019

# Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS



MEET AND GREET mit **Chefredakteur Daniel Lingenhöhl** und **Redakteurin Verena Tang**

Abonnentinnen und Abonnenten können am digitalen Redaktionsbesuch von **Spektrum** der Wissenschaft am 22. Februar 2022 teilnehmen.

Anmeldung und weitere Vorteile:  
**Spektrum.de/plus**

# DEMENZ VOM HELFER ZUM VERRÄTER

Spezielle Immunzellen im Gehirn, die Mikroglia, spielen eine wichtige Rolle bei der Entstehung der Alzheimerkrankheit. Das liefert neue Ansatzpunkte für die Therapie.



**Jason Ulrich** (links) ist Professor für Neurologie an der Washington University in St. Louis (USA). **David M. Holtzman** lehrt dort ebenfalls Neurologie und ist Direktor des Hope Center for Neurological Disorders sowie stellvertretender Direktor des Knight Alzheimer's Disease Research Center. Holtzman gründete mit Kollegen die Firma C2N Diagnostics und hat Beraterverträge mit verschiedenen Unternehmen, die teils auch seine Forschung mitfinanzieren.

► [spektrum.de/artikel/1974544](https://www.spektrum.de/artikel/1974544)

Im Jahr 1907 berichtete der Psychiater Alois Alzheimer (1864–1915) über den Fall einer 51-Jährigen aus einer Pflegeanstalt in Frankfurt am Main. Die Frau namens Auguste Deter litt bis zu ihrem Tod im April 1906 unter schwerem Gedächtnisverlust, Verwirrung und Desorientierung. Das sprach für eine gravierende Erkrankung ihres Gehirns, welches Alzheimer bei der Autopsie eingehend untersuchte. Dabei machte er bahnbrechende Entdeckungen: Die Hirnrinde der Patientin war auffallend verkleinert, offenbar geschrumpft infolge eines massenhaften Verlusts an Nervenzellen. Zudem fanden sich innerhalb der Neurone ungewöhnliche Proteinfasern und im Gewebe dazwischen weitere Eiweißablagerungen.

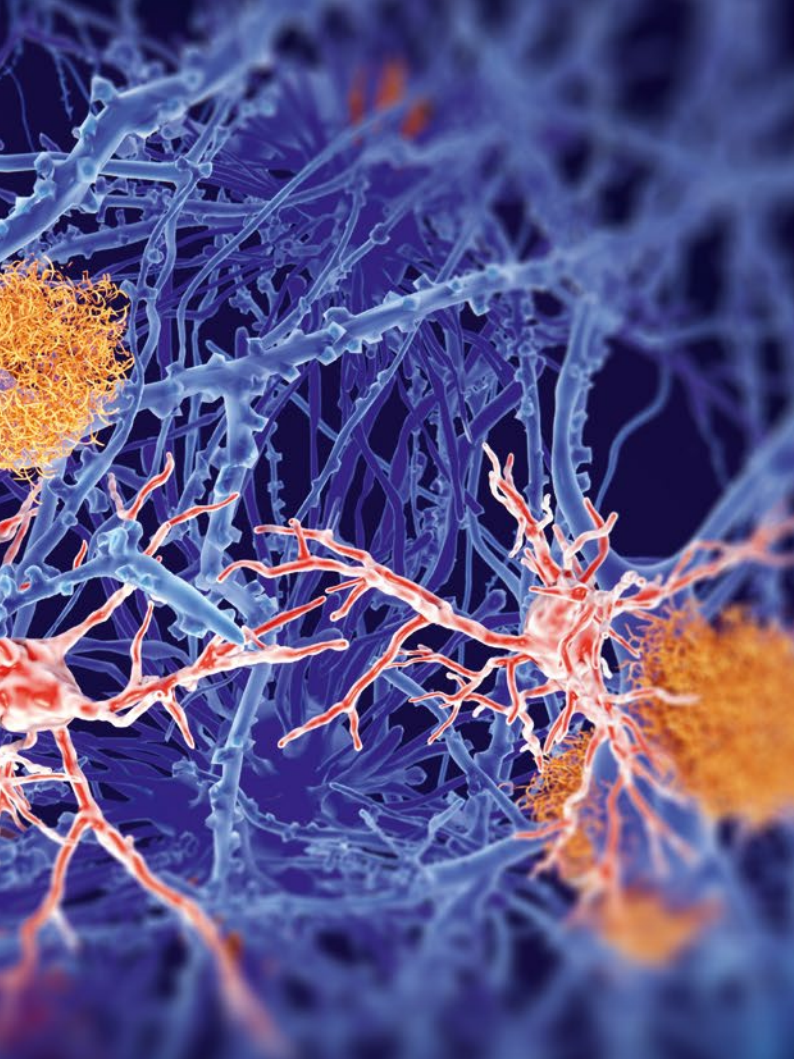
In den folgenden 100 Jahren rückten diese beiden Proteinansammlungen – Tau-Fibrillen und Beta-Amyloid-

Plaques – in den Mittelpunkt der Alzheimerforschung. Der Namenspatron der Krankheit, von der Millionen Menschen auf dem Globus betroffen sind, machte aber noch eine dritte, später meist vernachlässigte Beobachtung. Unter dem Mikroskop sah er Veränderungen an den Gliazellen, die gut die Hälfte der Hirnmasse eines Menschen ausmachen. Auf sie konzentrieren sich Demenzforscher neuerdings vermehrt.

Ein spezieller Typ der Gliazellen heißt Mikroglia. Dabei handelt es sich um die wichtigsten Immunzellen im Gehirn. Sie beeinflussen das Fortschreiten der Alzheimerkrankheit auf verschiedene Weise, sowohl in der Frühphase als auch in späteren Stadien. Diese Beteiligung der Mikroglia könnte die komplexe Beziehung zwischen Beta-Amyloid und Tau aufklären helfen, die den schleichenden Untergang von Nervenzellen bewirken.

Bis heute kann keine Therapie die Krankheit aufhalten oder wesentlich verlangsamen. Im Juni 2021 ließ die US-Arzneimittelbehörde FDA zwar das Medikament Aducanumab zu, das den Abbau von Amyloid im Gehirn beschleunigt. Doch noch ist unklar, wie gut es den Verlust kognitiver Fähigkeiten bremst. Als sicher gilt, dass es weiterer Behandlungsansätze bedarf, und auch hier eröffnen Mikroglia viel versprechende neue Wege.

Die Alzheimerkrankheit ist die weltweit häufigste Ursache für Demenz. Ihre Hauptmerkmale sind zum einen die genannten Plaques aus Beta-Amyloid, also Ansammlungen kurzkettiger Proteine zwischen den Zellen. Zum anderen ist in den Neuronen fehlgefaltetes Tau-Protein zu finden, an das



## AUF EINEN BLICK DIE FRÜHEN WURZELN DES GEDÄCHTNISVERLUSTS

- 1** Im Endstadium einer Alzheimerdemenz sterben massenhaft Neurone in der Großhirnrinde ab. Die Krankheit beginnt in aller Regel aber schon Jahre bis Jahrzehnte zuvor.
- 2** Neben fehlgefaltetem Beta-Amyloid sowie Tau-Fibrillen finden sich im Nervengewebe von Alzheimerpatienten meist auch Veränderungen an den Mikroglia, einem Typ von Immunzellen.
- 3** Anfangs schützen die Mikroglia die Neurone, fördern jedoch im Verlauf der Krankheit deren Tod. Dies hängt unter anderem von einer Reihe von Risikogenen ab.

**MIKROGLIAZELLEN**, hier in der Nähe von Beta-Amyloid-Plaques (orange), spielen eine zweiseitige Rolle bei der Alzheimerkrankheit.

sich viele Phosphatgruppen heften. Die Phosphorylierung verstärkt das Zusammenklumpen der Proteine, was die Neurone schädigt. Tau-Aggregate reichern sich als verdrehte Fibrillenbündel in den Zellen an, bis diese absterben.

Geringere Mengen von Tau-Protein finden sich bei Alzheimerpatienten zudem in den angeschwollenen, geschädigten Axonen – den signalleitenden Fortsätzen der Neurone. Diese Form ist als neuritisches Plaque-Tau bekannt. Tau wie auch das Ursprungsprotein des Amyloids erfüllen normalerweise wichtige Aufgaben, die durch den Krankheitsprozess gestört werden.

Heute weiß man, dass eine Alzheimererkrankung in zwei Stadien verläuft. Zunächst ist da eine symptomfreie Phase von etwa 15 bis 25 Jahren, während der sich Amyloid in der Hirnrinde ablagert, ohne dass es die kognitive Leistung merklich beeinträchtigt. In der zweiten Phase entwickeln sich dann die Tau-Fibrillen, und es kommt zur Neurodegeneration, dem Absterben der Zellen. Erst in diesem fortgeschrittenen Stadium treten Verluste der Hirnleistung auf.

Seit Jahrzehnten ist ebenfalls bekannt, dass genetische Faktoren das Erkrankungsrisiko beeinflussen. Das wichtigste der beteiligten Gene ist *APOE*. Es enthält den Bauplan für

das Apolipoprotein E, das am Fett- und Cholesterinstoffwechsel beteiligt ist.

Über die Verbindung des *APOE*-Gens mit der Alzheimerkrankheit berichteten Forscher erstmals 1993. Damals stellte man fest, dass manche Genversionen (Allele) das Krankheitsrisiko stark erhöhen. Die drei häufigsten *APOE*-Allele sind *APOE2*, *APOE3* und *APOE4*. Jeder Mensch verfügt über zwei *APOE*-Allele, bei zirka jedem vierten ist mindestens ein *APOE4*-Allel darunter. Unter den diagnostizierten Alzheimerpatienten beträgt diese Rate jedoch gut 60 Prozent.

Bei *APOE4*-Trägern bilden sich Amyloid-Plaques früher und reichlicher, weil die entsprechende Version des Apolipoproteins E die Beseitigung von Amyloid aus dem Gehirn behindert. Umgekehrt erkranken *APOE2*-Träger seltener an Alzheimer und entwickeln weniger Amyloid-Ablagerungen. Allerdings erklären diese Effekte nicht den gesamten genetischen Einfluss auf die Erkrankung.

Bei der Fahndung nach weiteren Risikofaktoren wurden mittels Gensequenzierung Tausende von Menschen auf DNA-Veränderungen hin untersucht. Mit solchen Screenings gelang es, Varianten der Gene *CD33*, *BIN1*, *CR1* und *MS4A6A* zu identifizieren, die jeweils verschiedene Funktionen erfüllen. So codieren *CD33* und *CR1* für Rezeptormoleküle auf der Zelloberfläche, die die Signalweiterleitung unterstützen. Sie beeinflussen das Erkrankungsrisiko insgesamt jedoch nur wenig.

Um bedeutendere Genvarianten zu finden, sequenzierten verschiedene Forschungsteams gezielt das Erbgut von Alzheimerpatienten. Im Jahr 2013 stieß man hierbei auf eine Version des Gens *TREM2*, das den Bauplan für einen Rezeptor in der Membran der Mikrogliazellen enthält. Die Sequenzdaten zeigten, dass mitunter an einer einzigen Stelle des Proteins die Aminosäure Arginin durch Histidin ersetzt ist. Diese Mutation beeinträchtigt offenbar die Funktion der Mikrogliazellen und erhöht das Alzheimerisiko um das

Zwei- bis Vierfache. Interessanterweise wird *TREM2*, wie auch andere Risikogene, allein in Mikroglia aktiv. Was genau hat das mit dem Krankheitsprozess zu tun?

Mikroglia sind mit den Makrophagen (große Fresszellen) verwandt – Immunzellen, die Krankheitserreger bekämpfen und verletztes Gewebe reparieren helfen. Unter normalen Bedingungen haben Mikroglia eher kleine Zellkörper mit langen, weit verzweigten Ausläufern. Sie verschlingen («phagozytieren») ungenutzte Synapsen und erkennen Eindringlinge. Kommt es zu einer Schädigung im Hirngewebe, verändern sie ihre Form und Funktion: Die Zellkörper wachsen, ihre Ausläufer dagegen schrumpfen oder verschwinden ganz. Dies ermöglicht es den Zellen, dorthin zu wandern, wo sie gebraucht werden, um Entzündungsreaktionen auszulösen.

Jahrzehntlang beobachtete man immer wieder Ansammlungen von Mikroglia in der Umgebung von Amyloid-Plaques. Unklar blieb, ob sie deren Entstehung beeinflussen oder eher lokale Entzündungen verursachen. Auch die Beziehung zwischen Mikroglia und Tau war lange unbekannt. Neue Studien deuteten nun darauf hin, dass Mikrogliazellen unter gewissen Umständen Neurone und ihre Synapsen angreifen, die Signalübertragung entlang der Axone stören und zur Anhäufung von Tau-Bündeln beitragen.

### **Kein Tiermodell bildet alle Aspekte der Alzheimerkrankheit nach**

So können von den Mikroglia ausgeschüttete Proteine, so genannte Zytokine, die Phosphorylierung von Tau-Protein verstärken. Um Rückschlüsse auf die Rolle der Mikroglia im Krankheitsprozess zu ziehen, sind wir auf Versuche mit Mäusen angewiesen. Bisher gibt es jedoch kein Tiermodell, das alle Aspekte der Alzheimerkrankheit nachbildet. Immerhin kennen Forscher mittlerweile mehrere Dutzend Mausvarianten, die es erlauben, jeweils einzelne Aspekte der Krankheit zu studieren: Die gentechnisch veränderten Nager entwickeln zum Beispiel Amyloid-Plaques oder Tau-Fibrillen.

Durch Kreuzung solcher transgenen Mäuse mit Tieren, die Veränderungen in bestimmten Risikogenen tragen, lässt sich feststellen, wie einzelne Genvarianten die Krankheitsentstehung beeinflussen. So entwickeln etwa Mäuse, die das menschliche APOE4-Protein produzieren, mehr Amyloid-Plaques als Tiere mit den Allelen *APOE3* oder *APOE2*.

In den letzten Jahren stellten Forscher auch Amyloid-Mäuse ohne *TREM2*-Protein her. Mehrere Arbeitsgruppen berichteten dabei von einer stark reduzierten Zahl an Mikroglia im Umkreis der Amyloid-Plaques. Untersuchungen aus dem Labor von Marco Colonna an der Washington University in St. Louis ergaben, dass die Mikroglia in solchen Mäusen unfähig sind, ihre Stoffwechselrate bei Bedarf ausreichend zu erhöhen. Wenn sich die Zellen in der Nähe von Amyloid-Plaques befinden, produzieren sie nicht genügend Adenosintriphosphat (ATP), den Treibstoff aller zellulären Vorgänge. Ohne diese Energie können die Mikroglia die Plaques wohl nicht umschließen und bekämpfen.

Zudem weisen die Tiere viele fehlgebildete Nervenzellen auf. Beide Merkmale – weniger Mikroglia im

Umkreis der Plaques sowie vermehrte Axonschäden – finden sich ebenso im Gehirn verstorbener Alzheimerpatienten, welche die oben genannte, 2013 entdeckte Mutation namens R47H im *TREM2*-Gen tragen. Dies spricht dafür, dass die Schäden bei Mäusen ohne *TREM2* auch beim Menschen von Bedeutung sind.

Arbeiten einer Forschergruppe um Peng Yuan und Jaime Grutzendler an der Yale University ergaben Hinweise darauf, wie Mikroglia zum Schutz von Neuronen beitragen. Offenbar interagieren die Immunzellen mit den freien Enden kleiner Amyloid-Ansammlungen. Daher können sie deren Wachstum in Richtung große Plaques stoppen und umliegende Neurone schützen.

Wenn Mikroglia Axone vor den Amyloid-Plaques bewahren, könnten sie vielleicht auch taubedingte Schäden verhindern? Dann müssten *TREM2*-Mutationen wie R47H die Alzheimererkrankung zusätzlich verschlimmern, indem sie das Entstehen von neuritischem Plaque-Tau fördern. Diese Hypothese zu prüfen, ist schwierig. Es gibt jedoch erste Befunde, die dafür sprechen.

Eine andere wichtige Entdeckung der letzten Jahre lautet: Tau und Beta-Amyloid bilden »Keime«, die ähnlich wie Prionen weitere Proteine zur Fehlfaltung und Verklumpung anregen. Vermutlich greift abnormes Tau-Protein im Lauf der Erkrankung auf benachbarte Hirnregionen über. Das Team von Virginia Man-Yee Lee an der University of Pennsylvania konnte zeigen, dass die Injektion von Tau-Bündeln aus dem Gehirn von Alzheimerkranken bei gesunden Mäusen eine Fehlfaltung von Tau auslöst. Tiere, die bereits eine Amyloid-Pathologie aufwiesen, entwickelten dann zudem neuritisches Tau, das die Axone schädigt. Das ähnelt den Vorgängen bei der Alzheimerdemenz. Der größte Unterschied ist, dass es bei den Mäusen zu keinem ausgeprägten Absterben von Neuronen kommt.

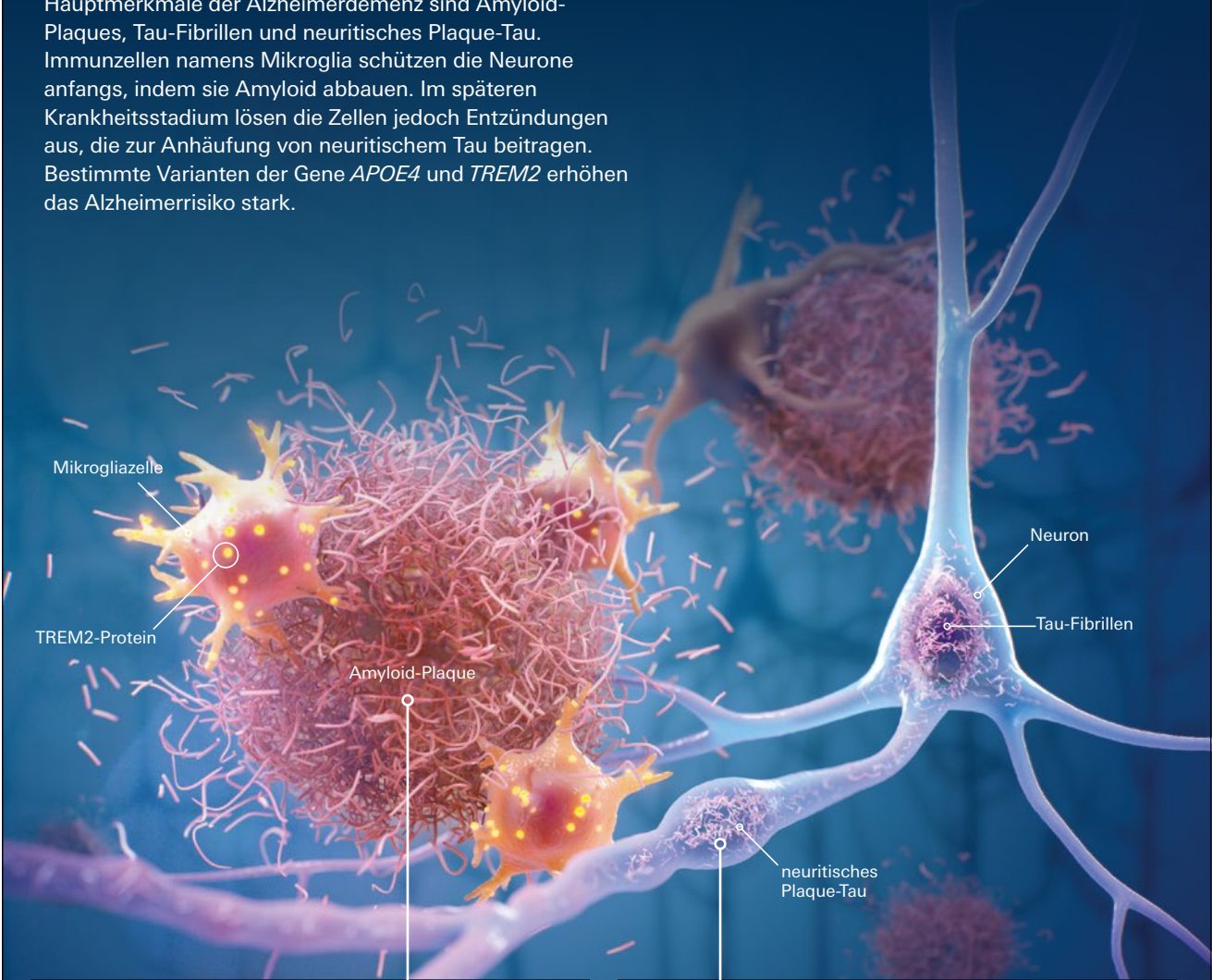
Normalerweise stabilisiert Tau in den Axonen von Nervenzellen die Mikrotubuli – röhrenförmige Strukturen, die dem Transport von Baumaterial im Inneren des Neurons dienen. In der Nähe von Amyloid-Plaques löst sich Tau leichter von den Mikrotubuli, wodurch es anfälliger für eine Umfaltung wird. Geschädigte Axone bilden anscheinend einen fruchtbaren Boden, auf dem krankhafte Tau-Samen »Wurzeln schlagen« können.

Da die R47H-Variante des *TREM2*-Proteins die Axondefekte verstärkt, vermuteten wir, dass nicht mutiertes *TREM2* den Immunzellen dabei hilft, Axone vor den Amyloid-Plaques zu schützen. Dies sollte die Anhäufung von Tau oder seine Ausbreitung in andere Hirnbereiche unterbinden. In einer Studie unter der Leitung von Cheryl Leys und Maud Gratuze in unserem Labor wurden Keime mit krankhaftem Tau aus verstorbenen Alzheimerpatienten in Mäuse mit und ohne funktionsfähiges *TREM2* injiziert. Später fand sich bei letzteren wesentlich mehr neuritisches Plaque-Tau in den Axonen. Die Schädigung breitete sich außerdem in andere Hirnbereiche aus.

Auch menschliche Patienten mit alzheimerassoziierten Varianten des Gens *TREM2* weisen mehr neuritisches Plaque-Tau auf. Offenbar schützt normales *TREM2*, gemeinsam mit den Mikroglia, das Gehirn vor der Ausbreitung von Tau. Das könnte die für die erste Krankheitsphase typischen

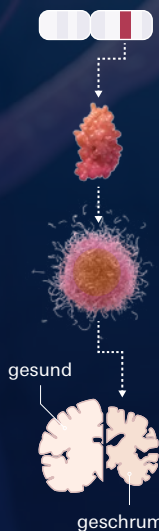
# Wenn die Müllabfuhr versagt

Hauptmerkmale der Alzheimerdemenz sind Amyloid-Plaques, Tau-Fibrillen und neuritisches Plaque-Tau. Immunzellen namens Mikroglia schützen die Neurone anfangs, indem sie Amyloid abbauen. Im späteren Krankheitsstadium lösen die Zellen jedoch Entzündungen aus, die zur Anhäufung von neuritischem Tau beitragen. Bestimmte Varianten der Gene *APOE4* und *TREM2* erhöhen das Alzheimerisiko stark.



### *APOE4*

Das auf Chromosom 19 gelegene Gen *APOE* ist vor allem am Fettstoffwechsel beteiligt. Es codiert für ein Protein, welches unter anderem von Mikrogliazellen produziert wird. Eine Variante des Gens, *APOE4*, wurde 1993 erstmals beschrieben. Das entsprechende Protein regt



Beta-Amyloid dazu an, sich zu Plaques zusammenzulagern. Das *APOE4*-Protein fördert auf diese Weise letztlich massenhaften Zellverlust und damit eine Schrumpfung des Gehirns (Atrophie).

### *TREM2*

Das Risikogen *TREM2* auf Chromosom 6 codiert für ein Rezeptorprotein auf der Oberfläche von Mikrogliazellen. Im Frühstadium der Alzheimerkrankheit hilft *TREM2*, amyloidbedingte Schäden sowie die Ausbreitung von Tau-Fibrillen zu reduzieren. Im späteren Verlauf kann es jedoch das Absterben der Neurone beschleunigen.



Eine Variante von *TREM2* namens R47H hat keine positiven Effekte. Es fördert die Ansammlung neuritischer Plaque-Taus, was die Neurodegeneration beschleunigt.

Proteinansammlungen verhindern helfen. Doch was ist, wenn bereits massenhafter Zelltod und damit Demenzsymptome eingetreten sind?

Zwei Studien – eine aus dem Labor von Ido Amit am Weizmann Institute of Science in Rehovot (Israel) und eine von Forschern um Oleg Butovsky vom Brigham and Women's Hospital in Boston – untersuchten die Aktivität von Mikroglia-Genen in Mäusen mit verschiedenen neurodegenerativen Erkrankungen und entdeckten dabei erstaunliche Parallelen.

Mikroglia in Mäusehirnen mit Veränderungen, die der taubedingten Neurodegeneration ähneln, aktivieren verschiedene Gene, deren Produkte zum Abbau unerwünschten Materials in der Zelle beitragen. Die Zellen produzierten zudem vermehrt die Mausversion des APOE4-Proteins. Augenscheinlich spielen sowohl APOE als auch TREM2 eine Rolle bei der Frage, wie die Mikroglia reagieren, wenn Neurone abzusterben drohen.

### **Das Alzheimer-Gen *APOE4* beschleunigt die Krankheit über zwei verschiedene Wege**

Das veranlasste uns zu weiteren Experimenten: Wir kreuzten Mäuse, die verschiedene Versionen des APOE-Proteins produzieren, mit solchen, die eine Tau-Pathologie und zugleich verstärkte Neurodegeneration zeigten. In einer Studie unter der Leitung von Yang Shi in unserem Labor stellte sich heraus, dass Mäuse mit menschlichem APOE4-Protein weit mehr Neurone verlieren und gravierendere Tau-Verklumpungen aufweisen als solche mit APOE3 oder APOE2.

Als Nächstes untersuchten wir den Zelltod im Gehirn von Patienten. Wieder wiesen *APOE4*-Träger größere Schäden auf als Personen mit anderen *APOE*-Allelen. Zudem bauten Alzheimerkranke mit *APOE4* geistig schneller ab. Dieses »Alzheimer-Gen« beschleunigt demnach nicht nur wie bisher bekannt die Amyloid-Ablagerung, sondern auch Schäden durch Tau – also beide Hauptmechanismen der Krankheit. Umgekehrt schützt das Fehlen von *APOE4* in hohem Maß vor Zellverlusten; es verzögert die Ansammlung von krankhaftem Tau und die dadurch verursachten Schäden.

Mäuse ohne *APOE* sind besser geschützt vor Neurodegeneration und Tau-Pathologie. Könnte dann ein Absenken des APOE-Spiegels die Neurodegeneration bei menschlichen Patienten verlangsamen – besonders bei solchen, die das *APOE4*-Allel tragen? In weiteren Experimenten verwendeten wir daher Mäuse mit Tau-Pathologie, die menschliches APOE4-Protein produzieren. Wir wollten herausfinden, ob diese Tiere vor einer Neurodegeneration geschützt sind, wenn wir die Menge an APOE4 in ihnen reduzieren.

Dazu kooperierten wir mit einem Unternehmen, das Antisense-Oligonukleotide herstellt – das sind kurze Abschnitte modifizierter DNA, die sich an *APOE4*-Boten-RNA-Moleküle (die molekulare Blaupause zur Proteinherstellung) binden und sie aus dem Verkehr ziehen. Das reduziert die Menge des APOE4-Proteins im Gehirn um etwa die Hälfte. Siehe da: Dies schützte die Neurone, sobald die Tau-Pathologie bei den Mäusen einsetzte, und verringerte Entzündungen sowie Mikroglia-Aktivierung im Gehirn.

Allmählich zeichnet sich ein immer schärferes Bild der beteiligten Krankheitsprozesse ab: Demnach spielen Mikrogliazellen eine doppelte Rolle bei der Entwicklung der Alzheimerdemenz. In der ersten Phase, wenn sich Beta-Amyloid ansammelt, scheinen sie das Gehirn zu schützen. Krankhaft verändertes Tau hingegen aktiviert Mikroglia-Gene, die den Zelltod fördern, wobei das APOE4-Protein Entzündungsprozesse im Gehirn beschleunigt. Somit führt die Reaktion der Mikroglia auf krankhaft verändertes Tau zu neuronalen Schäden, statt das Gehirn zu schützen.

Zwei Studien von 2019 lieferten weitere Indizien für die Rolle der Mikroglia als Treiber des neuronalen Abbaus in der Spätphase der Erkrankung. Ein Wirkstoff, der den »koloniestimulierenden Faktor 1« blockiert – ein für Mikroglia essentielles Protein –, reduziert diesen Zelltyp bei Mäusen um etwa 90 Prozent. Tau-Mäuse, denen man die Substanz verabreichte, zeigten daraufhin eine deutlich verminderte Tau-Pathologie und weniger Verluste an Nervenzellen. Anscheinend sind Mikroglia tatsächlich für die taubedingte Neurodegeneration mitverantwortlich. Schaltete man in Tau-Mäusen den Mikroglia-Oberflächenrezeptor TREM2 aus, reduzierten sich die Mikroglia-Aktivität sowie die neuronalen Schäden.

TREM2-vermittelte Signale haben also je nach Krankheitsstadium gegenteilige Effekte. Während der symptomfreien ersten Phase, wenn sich Amyloid ansammelt, vermindert TREM2 die dadurch verursachten Schäden. Außerdem hemmt es den Vormarsch von krankhaft verändertem Tau in der Hirnrinde. Sobald sich diese zweite Pathologie jedoch etabliert hat, scheint die Aktivität der Mikroglia den Verlust von Synapsen und Neuronen sogar voranzutreiben.

Sollte sich dies bei der menschlichen Alzheimerkrankheit ähnlich wie bei Mäusen nachweisen lassen (was im Moment noch ungewiss ist), könnten die Mikroglia ein wichtiger Schlüssel für neue Behandlungsoptionen sein. In der Frühphase der Erkrankung wäre es dann sinnvoll, ihre Aktivität im Bereich der Amyloid-Plaques zu stimulieren. Umgekehrt könnte ihre Hemmung im fortgeschrittenen Stadium der Tau-Pathologie den kognitiven Abbau verlangsamen.

Je genauer wir verstehen, wie Mikrogliazellen die Entstehung von Amyloid-Plaques und Tau-Fibrillen beeinflussen, desto mehr wächst die Hoffnung auf neue Angriffspunkte für die Therapie. In einer klinischen Studie prüfen Forscher derzeit, ob die Aktivierung von TREM2 die Alzheimerkrankheit im Frühstadium verlangsamt. Weitere Wirkstoffe, die bei den Mikroglia ansetzen, sind in der Entwicklung. So könnte sich der dritte, lange unbeachtete Befund in Alzheimers Bericht als entscheidend erweisen, um der Demenz endlich etwas entgegenzusetzen. ◀

#### QUELLEN

**Gratuze, M. et al.:** Impact of TREM2<sup>R47H</sup> variant on tau pathology-induced gliosis and neurodegeneration. *Journal of Clinical Investigation* 130, 2020

**Song, W. M., Colonna, M.:** The identity and function of microglia in neurodegeneration. *Nature Immunology* 19, 2018

**Yuan, P. et al.:** TREM2 haploinsufficiency in mice and humans impairs the microglia barrier function leading to decreased amyloid compaction and severe axonal dystrophy. *Neuron* 90, 2016





# 10 Jahre

AcademiaNet

Sie möchten Lehrstühle oder Gremien mit Frauen besetzen? Sie suchen Expertinnen, Gutachterinnen oder Rednerinnen?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 3.200 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

[www.academia-net.org](http://www.academia-net.org)

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

# TORFBRÄNDE ZOMBIEFEUER AUF DEM VORMARSCH

Im hohen Norden können vermeintlich erloschene Brände nach Monaten wieder zum Leben erwachen. Heiße, trockene Sommer und eine Besonderheit des arktischen Bodens begünstigen das Phänomen.



**Randi Jandt** (links) arbeitet als Feuerökologin und Biologin am International Arctic Research Center sowie am Alaska Fire Science Consortium der University of Alaska Fairbanks. Die Feuerökologin **Alison York** forscht ebenfalls am International Arctic Research Center und koordiniert das Alaska Fire Science Consortium.

» [spektrum.de/artikel/1974547](https://www.spektrum.de/artikel/1974547)

FEUER nahe dem Skilak-See in Alaska, entzündet durch einen Blitz. Mit der globalen Erwärmung werden die elektrischen Entladungen häufiger, vor allem in arktischen Breiten.



## AUF EINEN BLICK FLAMMEN AUS DER TIEFE

- 1** Der Boden in der Arktis ist von einer dicken Torfschicht bedeckt. Weil die Sommer in den hohen Breiten heute länger und heißer ausfallen, trocknet diese Schicht immer weiter aus.
- 2** Je trockener der Torf ist, desto tiefer können sich die Flammen bei einem Brand in den Boden fressen.
- 3** Mitunter kann das Feuer dort monatelange weiter-schwelen und sich unterirdisch ausbreiten. Als »Zombiefener« bricht es in der nächsten Feuersaison wieder an die Oberfläche.

Am 5. Juni 2019 entfachte ein Blitz während eines ungewöhnlich frühen Frühlingsgewitters ein Feuer mitten im Kenai National Wildlife Refuge auf der Kenai-Halbinsel im Süden des zentralen Alaska. Ende Mai hatten hohe Temperaturen dem nassen Frühling ein Ende gesetzt und den Waldboden rasch ausgetrocknet. Damit begann rund acht Kilometer nördlich der Stadt Sterling das Swan Lake Fire zu brennen und breitete sich bei anhaltend warmem Wetter über einen Monat lang unnachgiebig aus. Bereits am 9. Juli waren gut 400 Quadratkilometer Land verbrannt, 400 Menschen bekämpften jetzt die Flammen. Knapp sechs Wochen später, am 17. August, drehte der Wind, das Feuer änderte seine Richtung, und zahlreiche Bewohner wurden evakuiert. Weil der Wind Strommasten

umstürzte, entzündeten sich durch Funken neue Brände, die sich eigenständig ausbreiteten und daher ihre eigenen Namen erhielten: das Dëshka Landing Fire und das McKinley Fire. Allein ihnen fielen mehr als 130 Häuser und Gebäude zum Opfer, glücklicherweise starb niemand dabei.

Das Swan Lake Fire brannte bis Oktober, als der überfällige Regen einsetzte und die Feuerwehr den Flächenbrand endlich unter Kontrolle bekam. 676 Quadratkilometer Land waren verkoht. Mehrmals war während der fünf Monate dauernden Feuersbrunst der Sterling Highway geschlossen worden, die einzige größere Straße in der Gegend. Im Juni, Juli und August warnten die Gesundheitsbehörden an einem Drittel aller Tage vor der feinstaubgeschwängerten Luft – betroffen davon waren etwa 60 Prozent der Bevölkerung Alaskas. Unternehmen, die vom Tourismus abhängen, machten ein Fünftel weniger Umsatz.

Der Winter brachte mit Schnee und Kälte eine Atempause, doch im Januar 2020 entdeckte eine Mannschaft beim Präparieren von Schneepisten Rauch an der Stelle, an der wenige Monate vorher noch das Dëshka Landing Fire

gewütet hatte. Wie die Feuerwehrleute bei ihrer Ankunft feststellten, war der Brand niemals vollständig gelöscht worden: Er hatte vier Monate lang unterirdisch weitergeschwelt und fraß sich nun wieder durch die Schneedecke an die Oberfläche. Im Juni dann, als es in dem Staat langsam wärmer und trockener wurde, sichtete die Feuerwehr dort, wo das Swan Lake Fire gebrannt hatte, ebenfalls Rauch. Ganze acht Monate lang hatte es unbemerkt unter der Erde weitergeglüht, sich dort ausgebreitet und loderte jetzt wieder auf.

Zombiefeuer nennt man diese Art von Feuern, die scheinbar gelöscht sind, aber tatsächlich unbemerkt im Untergrund weiter vor sich hin glühen und dann plötzlich wieder zum Leben erwachen. Das ist möglich, weil Alaskas Feuersaison durch den Klimawandel heißer und länger wird. Seit 2005 hat die Feuerwehr von 48 Zombiefeuern in dem Staat berichtet, die den langen Winter überstanden haben. Rebecca Scholten, eine Fernerkundungsspezialistin der Freien Universität Amsterdam, die mit der Feuerwehr Alaska zusammenarbeitet, hat in Satellitendaten elf weitere nicht dokumentierte Feuer entdeckt. Das ungewöhnliche Phänomen findet man überall im hohen Norden – auch die extrem frühen Brände jeweils im März 2020 und 2021 in Nordsibirien gingen darauf zurück.

**KOLLAPS Wenn das Feuer die isolierende Torfschicht verbrennt, tritt der darunter liegende Permafrost zu Tage und taut auf. Der gesamte Boden sackt ab, mancherorts tun sich riesige Krater auf. Eine zerklüftete Landschaft ist die Folge.**



ERIC MILLER, BUREAU OF LAND MANAGEMENT, ALASKA FIRE SERVICE

Zombiefeuer können sich deshalb wieder entfachen, weil in den nördlichen Ökosystemen Bäume nicht der einzige, ja nicht einmal der wichtigste Brennstoff sind. In der baumlosen Tundra und den Nadelwäldern südlich davon bedeckt eine dicke Lage aus lebendem und totem Pflanzenmaterial den Boden: der Torf. Er ist eine Ansammlung von abgestorbenem Moos und Laub, das jeden Sommer anfällt und das sich in der Kälte nur sehr langsam zersetzt. Der Torf wird zwischen 8 und 50 Zentimeter dick. Die Schicht wächst mitunter über Jahrhunderte an und wird dabei immer kompakter und dichter, weil jedes Jahr neues Material von oben dazukommt.

Die grüne Oberfläche der Torfschicht besteht hauptsächlich aus Moosen, die weder Wurzeln noch Gefäße für den Wassertransport besitzen, sondern Feuchtigkeit direkt aus der Luft aufnehmen. Daher ändert sich ihr Wassergehalt fast direkt mit der relativen Luftfeuchtigkeit – selbst nach einem Regenguss trocknet das Moos mitunter innerhalb von Stunden so weit aus, dass es brennbar wird. Weil die Sommer in den hohen Breiten immer länger, heißer und trockener ausfallen, verwandeln sich weite Bereiche des Waldbodens dadurch in Pulverfässer, die ein Blitz oder eine unachtsame Person leicht entzünden kann. 1000 Quadratmeter Waldboden liefern dann zwischen 10 und 25 Tonnen Brennstoff für ein Feuer. Die Bäume steuern auf derselben Fläche höchstens 7 Tonnen bei – meist sind es noch deutlich weniger, denn die Flammen verzehren oft hauptsächlich Nadeln und Zweige und lassen die dichteren Stämme stehen.

Bei einem großen Brand gelangt eine gigantische Menge Kohlenstoffdioxid in die Luft, die zum guten Teil aus dem Torf stammt. Die dicken Torfschichten in den hohen Breiten speichern schätzungsweise 30 bis 40 Prozent des weltweit im Boden gebundenen Kohlenstoffs. Als 2015 rund 2,1 Millionen Hektar Land in Alaska verbrannten, gelangten knapp 9 Millionen Tonnen Kohlenstoff aus der stehenden Vegetation in die Luft – und 154 Millionen Tonnen aus dem Torf, errechnete Christopher Potter von der Earth Sciences Division der NASA im Jahr 2018. Hierbei hat er auch berücksichtigt, wie viel Kohlenstoff in den zwei darauf folgenden Jahren durch Zersetzung und Erosion freigesetzt wird. Insgesamt wurde durch das Feuer so viel CO<sub>2</sub> frei, wie Autos und Lkws in Kalifornien im Jahr 2017 in Summe ausgestoßen haben.

Der brennende Torf birgt aber noch ein weiteres Problem: Die dicken, kompakten Lagen organischen Materials bilden normalerweise eine zuverlässige Isolierschicht über dem gefrorenen Boden darunter. Taut dieser mindestens zwei Jahre in Folge nicht auf, nennt man ihn Permafrost – im größten Teil Alaskas ist er seit dem Pleistozän vor zehntausenden Jahren durchgängig gefroren. Je dicker die Isolierschicht, desto kälter bleibt er: Pro 1,3 Zentimeter Torfdicke gewinnt der frostige Boden 0,6 Grad Celsius an Kälte. Verbrennt der isolierende Torf jedoch, taut der Permafrost, und ganze Teile Alaskas verwandeln sich in eine weiche, instabile Masse. Schon allein durch die globale Erwärmung wird Alaska Voraussagen zufolge bis 2100 ein Viertel seines Permafrosts verloren haben. Die zunehmenden Feuer beschleunigen den Prozess stark, denn sobald



**DIE TORFSCHICHT** im hohen Norden kann bis zu 50 Zentimeter dick werden (Lineal, oben). Wie viel davon nach einem Brand verschwunden ist, überprüfen Fachleute mit Hilfe von Metallstäben, die vorher in den Torf eingebracht wurden (links).

die isolierende Schicht weniger als 5 Zoll (12,7 Zentimeter) dick ist, beginnt der gefrorene Boden darunter zu tauen und zerfällt. In den mittleren Breiten Alaskas könnte durch Waldbrände so viel Permafrost auftauen, dass er für immer verschwindet.

Taut mehr Boden auf, schmilzt außerdem das Eis in den unteren Torfschichten und fließt ab, so dass noch tiefer liegende Schichten austrocknen. Bei einem Brand kann sich das Feuer dadurch wiederum weiter nach unten fressen. Durch diese Rückkopplungsschleife wird höchstwahrscheinlich jedes Jahr mehr Fläche verbrennen – für Millionen von Menschen steigt die Gesundheitsgefährdung, den Klimawandel dürfte es beschleunigen. Möglicherweise wird die gesamte Region sogar von einer Kohlenstoffsenke zu einer Kohlenstoffquelle.

### Die schöne Vorstellung vom schneebedeckten Alaska

Viele stellen sich Alaska als schneebedeckte Fläche vor, die nur schwerlich brennen kann. In Wirklichkeit jedoch herrscht in weiten Teilen des nördlichsten US-Staats, vor allem im Landesinnern, ein kontinentales Klima mit langen, kalten Wintern und warmen, relativ trockenen Sommern. Fliegt man im Sommer über Alaska, blickt man auf eine ausgedehnte grüne Landschaft mit Wäldern, Wiesen und Seen. Das satte Erscheinungsbild trägt allerdings, denn in der Region fällt sehr wenig Niederschlag. Das Wasser, das die Pflanzen zum Wachsen benötigen, erhalten sie, wenn der Schnee im Frühling langsam und beständig schmilzt und durch das Auftauen der »aktiven Schicht« direkt unter dem Torf. In dieser oberen Bodenlage schwanken die Temperaturen so weit, dass sie jeden Winter einfriert und im Frühjahr wieder auftaut. Doch bei warmem Wetter kann die Torfschicht innerhalb von ein oder zwei Wochen staubtrocken werden.

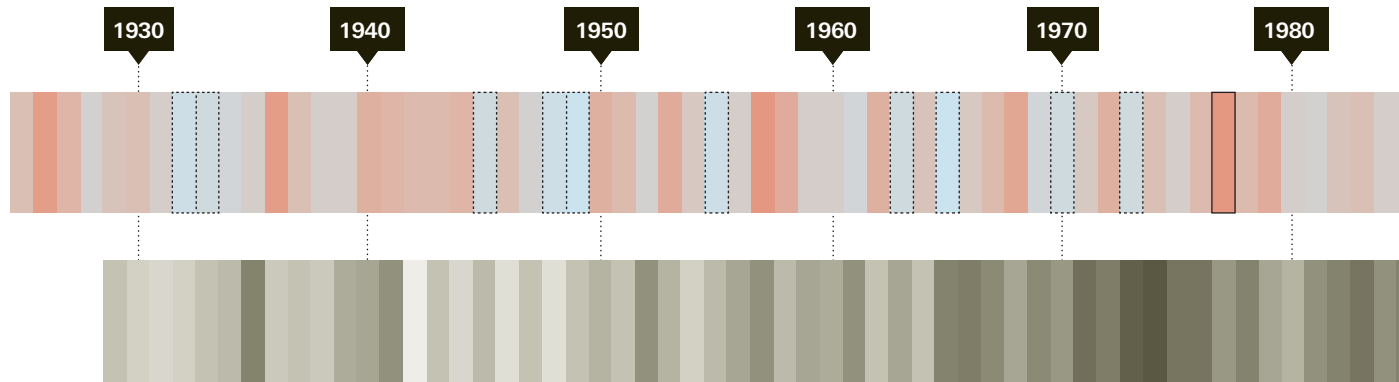
Nadelwälder stellen das größte Waldbiom der Erde dar, sie bilden 30 Prozent der weltweiten Waldfläche. Gleichzeitig sind sie dasjenige nördliche Ökosystem, das am anfäl-

ligsten für Feuer ist. In den Nadelwäldern im zentralen Alaska kommt hauptsächlich die Schwarzfichte vor. Diese Bäume sind klein, wachsen langsam und stehen dicht zusammen. Ihre Äste können bis hinunter zur Torfschicht reichen und bieten dem Feuer damit eine willkommene Leiter, an der es hochklettern kann. Als das vorherrschende Nadelholz in Alaska in den letzten 7000 Jahren haben sich die Schwarzfichten dem Feuer angepasst: Ihre Zapfen sitzen ganz oben auf den Wipfeln der Bäume und öffnen sich nach einem Brand. Dank der ausgestreuten Samen erholt sich das Ökosystem wieder.

Weil weite Teile des Staates nur dünn besiedelt sind, ist es gängige Praxis, auflodernde Feuer in entlegenen Gegenden lediglich zu beobachten und sie brennen zu lassen, so dass sich die Ökosysteme selbst regulieren. Deshalb hat Alaska auch kaum das Problem von anderen US-Bundesstaaten, wo die Wälder oft überwuchert sind und zu viel Totholz enthalten, weil Feuer stets bekämpft werden. Dank diesem wenig invasiven Ansatz können Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in Alaska direkt beobachten, wie sich Waldbrände durch den Klimawandel verändern, wenn der Mensch nicht eingreift.

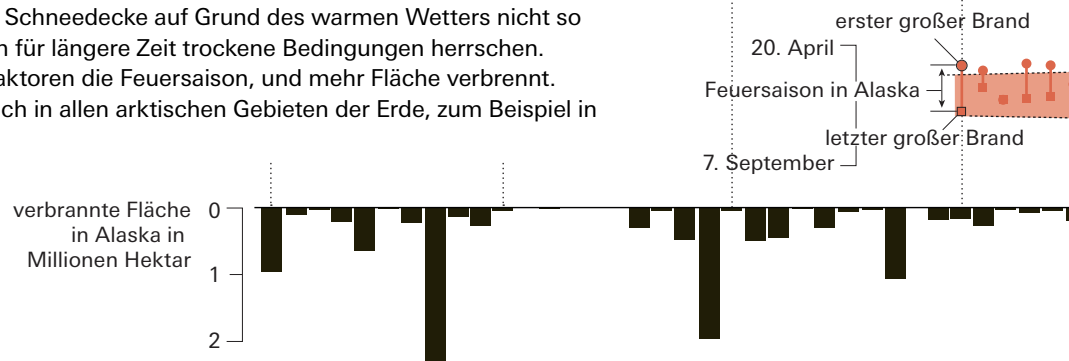
Bis vor Kurzem fielen den Feuern vor allem Bäume zum Opfer. In den Torf selbst drangen die Flammen nicht allzu tief vor, weil die unteren Schichten feucht genug waren. Unter heißen und trockenen Bedingungen kamen allerdings schon immer gelegentlich schwer wiegende Brände vor, die sich bis tief in den Boden gruben. Nach einem Brand entsteht dort, wo die Schwarzfichten standen, meist ein Flickenteppich aus Wiesen, Buschland und Laubwäldern, in denen vor allem Birke, Pappel und Espe wachsen. Jetzt werden diese extremen Ereignisse häufiger und heftiger: In den letzten Jahren haben Waldbrände in Alaska zunehmend viel Land verbrannt sowie länger und intensiver gewütet.

Die globale Erwärmung bringt mehr warme Tage, höhere Temperaturen und mehr Trockenheit. Dabei erwärmt sich



## Verschiedene Faktoren nähren die Feuer

Durch den Klimawandel nehmen Waldbrände in Alaska zu: Weil es heißer ist, vor allem nachts, trocknen Pflanzen und Waldboden aus und sind dadurch bei Dürre leichter brennbar. Außerdem bleibt die Schneedecke auf Grund des warmen Wetters nicht so lange liegen, so dass wiederum für längere Zeit trockene Bedingungen herrschen. Zusammen verlängern diese Faktoren die Feuersaison, und mehr Fläche verbrennt. Ganz ähnliche Muster finden sich in allen arktischen Gebieten der Erde, zum Beispiel in Sibirien.



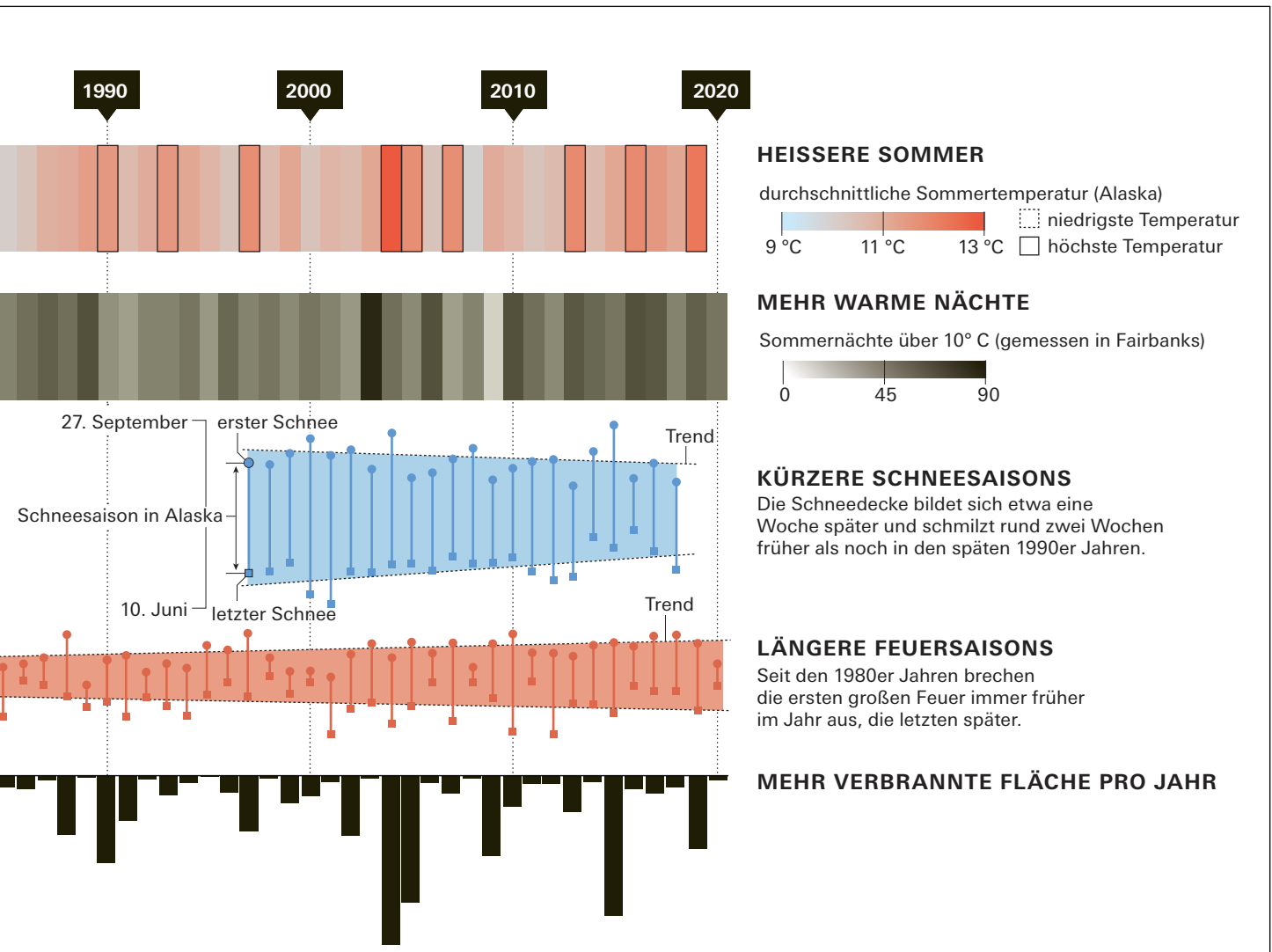
die gesamte Arktis anderthalb bis viermal so schnell wie die gemäßigten Zonen. So hat sich Alaska in den letzten 50 Jahren um 2,2 Grad Celsius aufgeheizt – und seit 2014 hat sich der Temperaturanstieg laut David Swanson vom Nationalparkservice Alaska Region sogar noch beschleunigt. Einer der Gründe für diese Arktische Verstärkung ist das Verschwinden des Meer- und Landeises: An die Stelle der reflektierenden hellen Eisflächen treten dunkler Ozean und Boden, die ungleich mehr Sonnenlicht absorbieren als Eis und Schnee und dadurch die Erwärmung vorantreiben.

Dabei werden die Winter rascher wärmer als die Sommer. Weil sich die Effekte addieren, bildet sich die Schneedecke im Schnitt eine Woche später und schmilzt zwei Wochen früher als in den 1990er Jahren. Dadurch trocknet über das Jahr mehr Torf, und so dauert die Feuersaison heute bereits mindestens einen Monat länger als damals. Einen Rekord stellte Alaska diesbezüglich 2016 auf: Am 17. April verzeichneten die Feuerspringer, die sich mit dem Fallschirm zu Waldbränden in abgelegenen Orten herablassen, nahe der Stadt Palmer 70 Kilometer nordöstlich der größten Stadt Anchorage den frühesten Einsatz in ihrer 67-jährigen Geschichte. Noch im Oktober kämpfte die

Alaska Division of Forestry gegen die Flammen – der Wind war so kalt, dass die per Helikopter abgeworfenen Wassermassen gefroren.

Die Zahl extrem heißer Tage nimmt ebenfalls zu. 2019 meldete Anchorage neue Hitzerekorde und erlebte zum ersten Mal mehr als 32 Grad Celsius. Nach den aktuellsten Klimamodellierungen wird das zentrale Alaska bis Mitte des Jahrhunderts doppelt so viele Tage über 25 Grad Celsius im Jahr verzeichnen wie heute – die Temperatur gilt als Grenzwert, bei der brennbare Vegetation austrocknet.

Nicht nur in Alaska, überall in den hohen Breiten brennt es heute häufiger und heftiger als früher. Innerhalb des Polarkreises wurden 2020 so viele Waldbrände per Satellit beobachtet wie noch nie. Schätzungen zufolge verbrannten allein in jenem Jahr 18000 Feuer etwa 14 Millionen Hektar Land in Sibirien. Die Temperaturanomalien in den umliegenden Gegenden waren Aufsehen erregend: Am 20. Juni meldete die russische Stadt Werchojansk, die sich auf ähnlichem Breitengrad befindet wie Nordalaska, einen Rekord von über 37,7 Grad Celsius. In der Region war nur wenig Niederschlag gefallen, und der Schnee hatte früher zu schmelzen begonnen als jemals seit Beginn der ersten



JEN CHRISTENSEN, NACHT GRABINSKI, Z. & MCFARLAND, H. R.: ALASKA'S CHANGING WILDFIRE ENVIRONMENT. ALASKA FIRE SCIENCE CONSORTIUM, INTERNATIONAL ARCTIC RESEARCH CENTER, UNIVERSITY OF ALASKA FAIRBANKS. 2020. TEMPERATUREN: RICK THOMAS, BASIEREND AUF DATEN DER NOAA. SCHNEE DES NÄCHSTEN HERBSTES: SCHNEESAISON, BRUNNEN/BREITTSCHNEIDER, BASIEREND AUF DATEN DES NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER. VERBRANNT FLÄCHE: NATIONAL FIRE DATA CENTER, BASIEREND AUF DATEN DES NATIONAL FIRE DATA CENTER. BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT.

Aufzeichnungen 1967. Und im Jahr 2021 wurde es noch schlimmer: Riesige Brände verwüsteten mehr als 17 Millionen Hektar Land in Sibirien. Die Feuersaison in der Republik Sacha im Nordosten Russlands dauern heute zwei Wochen länger als um 2010. Im Mai 2021 rief Island zum ersten Mal in seiner Geschichte Waldbrandalarm aus. Die Faktoren, die diese Feuer nähren, sind dieselben wie in Alaska. Und auch die Auswirkungen sind die gleichen: Verlust des Permafrosts mit all seinen beschriebenen Folgen.

### 1000 Quadratkilometer Land verwüstet

Ein extremes Beispiel dafür war das Anaktuvuk River Fire (ARF) im Jahr 2007. Dabei verbrannte eine riesige Fläche Tundralandschaft in North Slope, der nördlichsten Region Alaskas auf 70 Grad Breite. Jenseits des Polarkreises auf 67 Grad nördlicher Breite brennt es selten – noch nie wurde solch ein schwerer Brand so weit nördlich aufgezeichnet. Ein Blitz entzündete das Feuer im Juli. Im August schien es erloschen zu sein, doch es schwelte unbemerkt unter der baumlosen Oberfläche im Torf weiter und erwachte während des warmen Septembers spektakulär wieder zum Leben. Die Flammen schickten dicke Rauchschwaden über

große Flächen, noch in entfernten Dörfern machten sie den Menschen das Atmen schwer. Indigene Jäger berichteten, dass der Rauch die Wanderungen der Karibu störte. Weil der Herbst derart trocken war, konnte sich das Feuer tief in den dürregeplagten Torf fressen, wo es bis in den Oktober hinein weiterschwelte, als die Seen zufroren und Schnee die Landschaft wieder bedeckte. Am Ende waren mehr als 1000 Quadratkilometer zusammenhängendes Permafrostgebiet zerstört.

Dieses Feuer war so außergewöhnlich, dass eine von uns (Randi Jandt) eine zehn Jahre dauernde Studie zu den Folgen für die Vegetation und die aktive Schicht des Torfs in Angriff nahm. Anfang Juli 2008, zu Beginn des darauf folgenden arktischen Sommers, landete sie mit ihrem wissenschaftlichen Team per Helikopter in dem Gebiet, in dem die Feuersbrunst gewütet hatte. Normalerweise herrscht in North Slope zu der Jahreszeit kaltes, windiges und nieseliges Wetter. Doch der Helikopter landete auf einer riesigen Fläche aus verkohltem Boden unter einem klaren, blauen Himmel. Es herrschten unglaubliche 26,7 Grad Celsius – viel zu warm für die Wissenschaftler in ihren gefütterten Stiefeln.



**SCHWARZFICHTEN dominieren die Nadelwälder Alaskas. Die Bäume sind an das Feuer angepasst und erholen sich oft wieder. Doch nach sehr verheerenden Bränden, wie sie immer häufiger vorkommen, siedeln sich an ihrer Stelle Laubbäume wie Birke, Espe und Pappel an. Das verändert die Ökosysteme langfristig.**

Jenseits des Polarkreises hat sich Alaska am stärksten erwärmt: So ist die mittlere Jahrestemperatur in Utqiagvik am nördlichsten Zipfel der Küste von 1976 bis 2018 um 6,3 Grad Celsius gestiegen, die Herbsttemperaturen sind sogar um 10 Grad Celsius höher. Und noch etwas hat in den nördlichsten Regionen am stärksten zugenommen: die Zahl der Blitze, die jährlich niedergehen.

Das Team sah, wie sich durch die warmen, aufsteigenden Luftmassen Kumuluswolken bildeten. Aus dieser Art von Wolken können Gewitter entstehen. Die Bewohner des Inlands von Alaska sind es gewohnt, dass sich im Sommer heftige Gewitter zusammenbrauen – vor allem im Juni und Juli, wenn die Sonne fast 24 Stunden lang am Himmel steht. Durch Blitze entfachte Feuer sind für 90 Prozent der jährlich verbrannten Fläche in Alaska sowie in Kanadas Tundra und Nadelwäldern verantwortlich. Aber in North Slope waren Blitze selten. Eine Älteste der Iñupiat, die ihr gesamtes Leben in Utqiagvik verbracht hatte, sagte, sie habe vor 1992 noch nie ein Gewitter erlebt. Pro Grad Celsius Erderwärmung würden in den zusammenhängenden Bundesstaaten der USA 12 Prozent mehr Blitze niedergehen, sagte der Klimaphysiker David Romps von der University of California in Berkeley 2014 voraus. Auf Grund der Arktischen Verstärkung wird der Effekt weiter nördlich deutlicher zu Tage treten: Ein Team um den Klimawissenschaftler Peter Bieniek von der University of Alaska Fairbanks errechnete 2020, dass 2019 in Alaska 17 Prozent mehr Blitze zu sehen waren als in den 30 Jahren zuvor. In der Arktis insgesamt hat sich die Zahl der atmosphärischen Entladungen zwischen 2010 und 2020 verdreifacht, zeigte

eine Studie des Atmosphärenphysikers Robert Holzworth von der University of Washington aus dem Jahr 2021. Und laut Modellierungen von Sander Veraverbeke, Professor für Fernerkundung an der Freien Universität Amsterdam, könnte Alaska im Jahr 2050 sogar 59 Prozent mehr davon sehen als heute (als »heute« definierte er den Mittelwert von 1986 bis 2005), wenn man annimmt, dass die Treibhausgasemissionen weiterhin so steigen wie in den letzten Jahren. Dadurch könnte dem Forscher zufolge dann jährlich etwa eineinhalb mal so viel Fläche verbrennen wie heute.

Was anschließend mit der verbrannten Landschaft passiert, hat das wissenschaftliche Team von Randi Jandt über die folgenden zehn Jahre verfolgt. Ihre jährlichen Datenmessungen zeigten zunächst Veränderungen, wie sie auch nach anderen schweren Feuern in Alaska und im Norden zu beobachten sind. Jedes Mal, wenn die Forscherinnen und Forscher in der verbrannten Region waren, erfassten sie die Pflanzenbedeckung und trieben an festgelegten Stellen Metallröhrchen in den Boden, um die Dicke der aktiven Schicht zu messen. Jedes Jahr reichte die aufgetaute Bodenschicht weiter hinunter: im ersten Jahr 10 Zentimeter tiefer als außerhalb der verbrannten Fläche, vier Jahre nach dem Brand waren es 19 Zentimeter. Nach zehn Jahren schien sich die aktive Schicht zu erholen – möglicherweise setzte sich der Tauvorgang nicht tiefer nach unten fort.

### **Dramatische Metamorphose**

Aus diesen Messdaten lässt sich aber nicht annähernd erahnen, in welchen Dimensionen sich die Landschaft nach dem Feuer verändert hat. Die gesamte Haut der Erde rutschte ab und riss ein, als der gefrorene Boden auftaute und das vormalige Eis als Wasser abfloss. Riesige Stücke Erdreich begannen zu sinken oder abzusacken, weil das tragende Gerüst des Permafrosts auseinanderfiel. Vom Helikopter aus betrachtet sahen weitflächige Bereiche der baumlosen Landschaft aus wie ein Schachbrett aus Erdquadraten, zwischen denen sich dunkle, spaltenartige Kanäle auftaten



und immer tiefer wurden. Wo die Hänge durch das Tauen instabil wurden, öffneten sich bis zu 60 Meter breite Krater. Eisschollen kamen nach 60000 Jahren unter der Erde zum Vorschein.

Um das sich verändernde Land zu vermessen, stießen Ben Jones und Carson Baughman vom U.S. Geological Survey im Jahr 2017 zu den Exkursionen. Mittels Bordradar maß Jones, dass der Boden großflächig zwischen zehn Zentimeter und einen Meter weit abgesunken war. Die Oberflächenrauigkeit, ein Maß für die Absenkung des Bodens, war in der östlichen Hälfte des verbrannten Gebiets dreimal so hoch wie außerhalb. Das bedeutet: tiefere Risse, höhere Hügel, eine größere Oberfläche.

Jones und Baughman ließen Messsonden in verbrannten und nicht verbrannten Gebieten zurück, die weiterhin die Temperatur aufzeichneten. Wie ihre Messungen zeigten, war der Boden in 15 Zentimeter Tiefe in dem verbrannten Gebiet im jährlichen Mittel rund 1,5 Grad Celsius wärmer als außerhalb, im Sommer maßen die Wissenschaftler im Boden sogar 6 Grad Celsius mehr. Diese Erwärmung gefährdet nicht nur den Permafrost, sondern beeinflusst auch, welche Pflanzen in der Region vorherrschen. Zehn Jahre nach dem Brand hatten sich große Büsche, Gräser und andere Gefäßpflanzen gewaltig ausgebreitet. In wärmeren Böden können schnell wachsende Gräser und Weidenbüsche die langsamer wachsenden Moose, Farne und Zwergsträucher verdrängen, die dort vor der Feuersbrunst hauptsächlich anzutreffen waren. Solche Neuzugänge werfen jedes Jahr mehr trockenes Laub auf die ständig wachsende Brennstoffschicht als die Moose. Das könnte erklären, warum sich im Jahr 2017 gleich zwei neue Feuernarben von je rund 40 Hektar innerhalb der alten Brandfläche wiederfanden. Dass nach so kurzer Zeit ein Feuer an einer bereits verbrannten Stelle wiederkehrt, ist ungewöhnlich – normalerweise hätten dazwischen mehrere hundert Jahre vergehen müssen.

Welche Folgen haben die massiven Brände in der Arktis nun im Ganzen? Treibhausgasausstoß, Luftverschmutzung und zerstörte Infrastruktur sind offensichtlich. Schwieriger sind die indirekten Konsequenzen vorherzusagen, wobei manche zu erwarten sind: etwa, dass sich der Boden im Sommer erwärmt, weil die verkohlte Oberfläche schwarz ist, dass die Landschaft zerklüftet und dass sich die Vegetation nach einiger Zeit erholt, wenn die verbrannten Pflanzen wieder austreiben oder neue Samen auskeimen. Tiefere Bereiche des Bodens werden vermutlich saisonal auftauen, der Permafrost verschwindet womöglich. Wenn das Eis taut, werden tiefer liegende Gebiete vielleicht vorübergehend feuchter, so dass dort Gräser, Büsche und Laubbäume wachsen.

Langfristig könnte sich der Boden allerdings sogar noch weiter erwärmen, wenn mehr Büsche in der Tundra sprießen. Denn zum einen findet auf ihnen mehr Schnee Platz, der den Boden gegen die kalte Luft isoliert. Abgebrannte Hänge und Kliffe werden vermutlich trockener, wenn das Tauen sich in die Tiefe fortsetzt, so dass noch mehr Wasser nach unten abfließt. Neue Sensoren haben bereits Reservoire nicht gefrorenen Bodens entdeckt, die sich weit unter den verbrannten Flächen befinden und aus denen Kanäle

mit Tauwasser in den Permafrost reichen. Wenn sich in den Nadelwäldern die natürliche Umgebung und das Baumkronendach verändern, beeinflusst das die Wanderungen der Tiere. Mikroben in warmem Wasser verdauen mehr des schon lange im Torf und bisherigen Permafrost gebundenen Kohlenstoffs zu den Treibhausgasen Kohlenstoffdioxid und Methan.

Die zunehmenden Feuer in den nördlichen Wäldern und der Tundra und die damit verbundene kaskadenartige Veränderung der Ökosysteme haben weltweite Auswirkungen, die sich nur mit Hilfe großer Computermodelle abschätzen lassen. Solche Simulationen sagen voraus, dass sich die Zahl der Brände in nördlichen Gegenden bis zum Ende des Jahrhunderts verdoppeln oder gar vervierfachen könnte. Der Torf würde dann enorme Mengen an Treibhausgasen freisetzen. Dadurch würden diese Regionen von einer Kohlenstoffsenke zur einer Kohlenstoffquelle, was den Klimawandel weiter verstärken würde.

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/feueroekologie](https://www.spektrum.de/t/feueroekologie)



GILITUKHIA / STOCK.ADOBE.COM

Vielleicht gibt es aber auch gute Nachrichten. Siedeln sich an Stelle von Nadelhölzern wie der Fichte schwerer brennbare Bäume wie Birke oder Espe an, dann werden die Waldbrände möglicherweise nicht in so starkem Maß zunehmen wie vorhergesagt. Denselben Effekt könnte es haben, wenn mehr Regen fällt, weil weniger Meereis vorhanden ist. Laubbäume reflektieren außerdem mehr Sonnenlicht als Nadelbäume – zumindest im Winter, wenn sie ihre Blätter abwerfen und das Licht durch den darunter liegenden Schnee zurückgeworfen wird. Auf den wärmeren Tundraböden wachsen bereits jetzt mehr Sträucher, und letztlich könnten sich dort auch Bäume ansiedeln. Sie würden einen Teil des verlorenen Kohlenstoffs wieder binden. Doch der Teufel liegt im Detail. Um zu wissen, wie die Faktoren sich gegenseitig beeinflussen, müssen wir jeden einzelnen von ihnen besser einschätzen können. ◀

### QUELLEN

**Randt, R. R. et al.:** Fire effects 10 years after the Anaktuvuk river tundra fires. Technical report, U.S. Department of the Interior Bureau of Land Management, 2021

**Romps, D. M. et al.:** Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346, 2014

**Scholten, R. C. et al.:** Overwintering fires in boreal forests. *Nature* 591, 2021

### WEBLINK

[www.spektrum.de/news/1658352](https://www.spektrum.de/news/1658352)

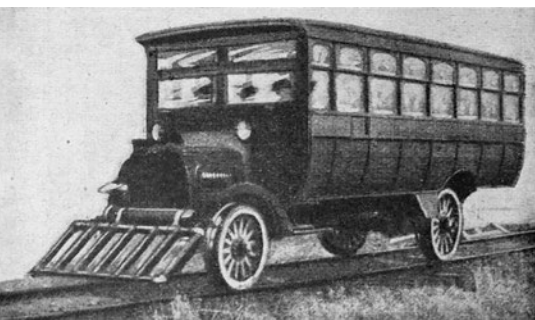
*Wie Torfbrände in der Arktis den Permafrost zerstören*

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

## ALS AUCH DER PAPST KOPERNIKUS GLAUBTE

»Hundert Jahre sind es nunmehr, daß sich – mit Genehmigung des Kardinalskollegiums – die Erde um die Sonne dreht. Als Koppernikus um 1530 seine heliozentrische Lehre vom Aufbau unseres Weltsystems entwickelte, stieß er wohl auf Widerspruch; Luther schalt ihn einen Narren; Melanchthon riet, die gottlose Lehre zu unterdrücken. Aber erst 100 Jahre später griff die Kirche ein. Ihre Zensurbehörde, die heilige Kongregation, erließ 1616 folgenden Erlaß: ›... daß die Bücher des Koppernikus und alle anderen, die dasselbe lehren, bis zur Verbesserung zu verbieten sind.‹ Erst 1822 entschied das Kardinalskollegium, daß auch in katholischen Ländern die Lehre des Koppernikus verbreitet werden dürfe.« *Die Umschau 10, S. 156*

## EIN OMNIBUS AUF SCHIENEN



Der Kraftwagen als Eisenbahn.

»Zur Verringerung der Betriebskosten ist die Winchester and Western Railroad in Virginia auf folgenden Ausweg verfallen. Sie hat auf das Chassis eines 2½ t-Lastkraftwagens eine Omnibuskarosserie für 34 Personen montieren lassen.

Als einzige Abänderung wurde der Kraftwagen mit kleinen Rädern versehen, außerdem wurde – nach amerikanischer Sitte – ein Räumer vorgebaut. Der Wagen soll sich gut bewähren und ist beim Publikum beliebt. Er stellt für Kleinbahnen etwa das dar, was auf der Hauptbahn der Triebwagen ist.« *Die Umschau 11, S. 172*

## PETROLEUM ALS FLIEGERTREIBSTOFF?

»Auf Seeland fand vom Flugplatz Lundtofte bei Kopenhagen aus die erste Fahrt in der Welt mit einem Flugzeug statt, das Petroleum als Feuerung benutzte. Es handelt sich um einen Petroleumkarburator, eine Erfindung des Dänen Ellehammer. Der Karburator [war] in eine Rumplermaschine mit 150 PS-Benzomotor eingesetzt worden. Der Motor lief in jeder Beziehung befriedigend. Er zog ebenso gut wie mit Benzin, die Erschütterung war geringer, und es entstand nicht der mindeste Ruß. Es wurde eine geringere Menge Petroleum als Benzin verbraucht.« *Technische Monatshefte 3, S. 72*

# 1922

## DER ELEFANTENFUß – SO WEICH WIE GELATINE

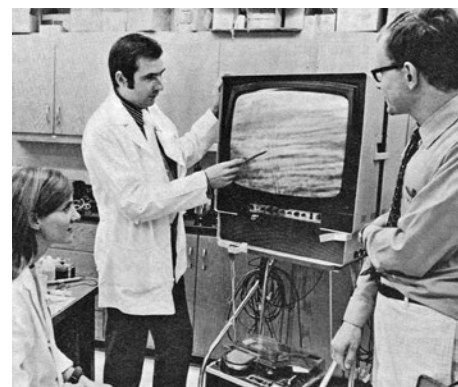
»Elefanten können trotz ihres großen Gewichtes (bis zu 7000 kg) durch tiefen Schlamm waten, ohne einzusinken und festzustecken. Diese Fähigkeiten beruhen auf der Konstruktion des Elefantenfußes. Beim Aufsetzen breitet sich dieser wie ein mit Gelatine gefüllter Beutel aus, beim Abheben nimmt der Fuß wieder seine normale Form an. Auch das Durchqueren von Urwald erfolgt leise, indem die durch elastisches Bindegewebe gepolsterten Füße als Puffer wirken, die Geräusche dämpfen.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 3, S. 115*

## ATOME ENDLICH SICHTBAR

»Atome mit einem Mikroskop sehen zu können, war schon immer ein Wunsch der Physiker. Daß dies mit einem Lichtmikroskop nicht möglich ist, hatten sie früh erkannt. Nun kann man tatsächlich mit dem Feldionenmikroskop die oberste Schicht von Metallkristallen so abbilden, daß die gitterförmige Lagerung der Atome sichtbar wird. Doch jetzt ist auch das Elektronenmikroskop auf [diesen] Stand gebracht worden. Jedes Atom gibt dabei nur einen Punkt auf dem Mikrofoto. Auch gelingt es nur, besonders schwere Atome sichtbar zu machen, da leichtere keinen ausreichenden Kontrast geben.« *Kosmos 3, S. \*67*

## HOHER BLUTDRUCK IM FERNSEHEN

»Bluthochdruck ist charakterisiert durch eine Verengung der kleinen Gefäße, die den Zu- und Abfluß des Blutes im Körpergewebe regeln. Hoher Blutdruck ist einer der Faktoren, die zu Herzkrankenarterienkrankungen, Schlaganfall und Nierenversagen führen. Medikamente greifen aber nicht an der Ursache des Leidens an. Welche Veränderungen erzeugen hohen Blutdruck? Um dieser Frage auf den Grund zu gehen, untersucht Phillip M. Hutchins Ratten mit hohem Blutdruck. Bei starker Vergrößerung beobachtet er den Blutstrom durch die kleinsten Blutgefäße in den Muskeln. An das Mikroskop ist eine Fernsehkamera angeschlossen, so daß die Bilder auf Magnetbänder für einen Vergleich gespeichert werden können.« *Die Umschau 5, S. 165*



Der Monitor zeigt den Blutstrom in einem Rattenmuskel.



FRANZI SCHÄREL / FOTODIEM.FREISTETTER.DE/PRESSE/ / CC BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/DK-SAM.0/Legalcode)

# FREISTETTERS FORMELWELT DIE MATHEMATIK DER UNGLEICHHEIT

Wie das Vermögen einer Bevölkerung verteilt ist, vermag die Mathematik aufzuzeigen. Das damit verbundene Problem kann sie aber leider nicht lösen.

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

► [spektrum.de/artikel/1974550](http://spektrum.de/artikel/1974550)

Jedes Jahr muss man sich mit Bürokratie beschäftigen und seine Steuerunterlagen auf den neuesten Stand bringen. Dabei denkt man unweigerlich über die eigene finanzielle Lage nach. Wie wohlhabend oder gar reich man sich fühlt, hängt sicherlich von der individuellen Situation ab.

Aber da es um konkrete Zahlen geht, lässt es sich auch ganz objektiv einschätzen. Wer mehr als 600 000 Euro besitzt, gehört zu den reichsten zehn Prozent der Menschen in Deutschland. Mit über einer Million Euro zählt man zum wohlhabendsten Prozent, das – zumindest noch im Jahr 2017 – so viel Vermögen besaß wie die ärmsten 75 Prozent der Deutschen.

Wenn ein Prozent über mehr Geld verfügt wie drei Viertel der Bevölkerung, dann klingt das unfair. Kein Wunder also, dass die Debatte schnell emotional wird, sobald es um Vermögen und gerechte Verteilung geht. Daher sollte man ein vernünftiges mathematisches Fundament für die Diskussion schaffen. Zum Beispiel durch Lorenz-Kurven und den Gini-Koeffizienten. Letzterer lässt sich durch eine Formel bestimmen, die in ihrer Einfachheit einen falschen Eindruck der dahinterliegenden Komplexität erwecken kann.

$$G = \frac{A - B}{A}$$

hat der US-amerikanische Ökonom Max Otto Lorenz Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelt, um das Ausmaß an Ungleichheit in Verteilungen zu veranschaulichen. Man kann zum Beispiel folgende Vermögensverteilung innerhalb einer Bevölkerung betrachten: Ein Prozent besitzt 40 Prozent des gesamten Vermögens; 9 Prozent haben ein Viertel, 40 Prozent verfügen über ein Drittel und die restlichen 50 Prozent besitzen zusammen zwei Prozent der Vermögenswerte. Die Zahlen entsprechen annähernd der Situation in Österreich.

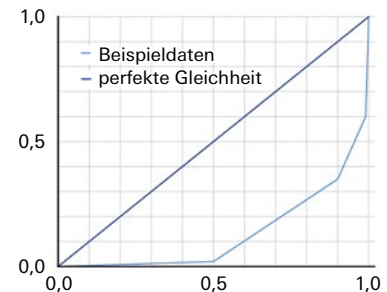
Um die Hintergründe bei der Berechnung des Gini-Koeffizienten  $G$  zu verstehen, muss man mit der Lorenz-Kurve starten. Diese

Daraus lässt sich ein Diagramm erstellen, auf dessen x-Achse der Bevölkerungsanteil steht, und auf der y-Achse der Anteil des Gesamtvermögens, den dieser Teil der Bürger besitzt.

Es ist klar, dass die resultierende Kurve stets bei (0; 0) startet und bei (1; 1) endet. Niemand hat nichts und alle zusammen besitzen alles. Dazwischen wird es aber interessant. Der erste Datenpunkt im genannten Beispiel würde bei (0,5; 0,02) liegen: Die Hälfte der Menschen hat zwei Prozent des Vermögens. Der nächste Punkt folgt bei (0,9; 0,35), da die 40 Prozent hinzukommen, die insgesamt ein Drittel der Werte besitzen (0,5 + 0,4 = 0,9 und 0,02 + 0,33 = 0,35). Wenn man so weitermacht, erhält man eine Kurve, die zuerst sehr langsam, schließlich aber extrem steil zu (1; 1) ansteigt.

Wäre das Vermögen völlig gleich verteilt, ergäbe sich eine »Gleichheitslinie«, die unter einem Winkel von 45 Grad von (0; 0) nach (1; 1) verläuft. Die Lorenz-Kurve liegt immer darunter – umso mehr, je ungleicher die Verteilung ist. Die Fläche zwischen der Kurve und der Gleichheitsgeraden wächst also mit zunehmender Ungleichheit. Genau das drückt die Formel für den Gini-Koeffizienten aus.  $A$  entspricht der Fläche unter der Gleichheitslinie,  $B$  jener unter der Lorenz-Kurve.

2017 lag der Gini-Koeffizient in Deutschland bei 0,83 – höher als in jedem anderen Land des Euro-raums und höher als in den Jahren zuvor. Man kann durchaus über die Interpretation des Koeffizienten diskutieren, etwa die unterschiedlichen Arten, ihn zu berechnen, und die Qualität der zu Grunde liegenden Daten. Klar ist aber: Die Schere zwischen Arm und Reich wird größer. Dieses Problem lässt sich mit Mathematik allerdings nur bedingt lösen.





**KOMPLEXES INNENLEBEN** Das Plasma-gefäß des Forschungsreaktors Wendelstein 7-X in Greifswald, hier ohne Wandverkleidung.

# ENERGIETECHNIK

## WETTLAUF ZUM ERSTEN FUSIONSREAKTOR

Mit dem Versprechen, schon im kommenden Jahrzehnt die Kernfusion endlich kommerziell nutzbar zu machen, konnten sich zuletzt gleich mehrere Start-ups Milliardeninvestitionen sichern. Der Optimismus in der Branche ist groß; die technischen Herausforderungen sind es ebenfalls.

Philip Ball ist Wissenschaftsjournalist in London.

» [spektrum.de/artikel/1974559](https://spektrum.de/artikel/1974559)



### AUF EINEN BLICK

#### TURBO AUS DER PRIVATWIRTSCHAFT

- 1** Bei der Verschmelzung zweier Wasserstoffkerne werden ungeheure Energiemengen frei. Deshalb wollen Ingenieure schon seit den 1950er Jahren den Prozess, der unsere Sonne antreibt, in Kraftwerken nutzbar machen.
- 2** Die Bändigung des heißen Plasmas erwies sich jedoch als überaus anspruchsvoll und erfordert komplizierte und teure Geräte. Groß angelegte Forschungsvorhaben kamen daher nur langsam voran.
- 3** Neue Materialien, Fortschritte bei Computersimulationen und alternative Konzepte könnten Abkürzungen ermöglichen. Unternehmen warben dafür zuletzt üppige Finanzmittel ein.

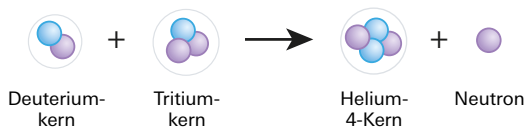
► Auf den ersten Blick wirkt das alte 450-Seelen-Dorf Culham westlich von London nicht wie ein Ort, an dem eine Schlüsseltechnologie der Zukunft entwickelt wird. Aber von 2022 an soll hier auf einem ehemaligen Flugfeld in einem glänzenden Gebäude aus Glas und Stahl ein Experiment starten, das der Menschheit vielleicht einen Weg weist, wie sie im 21. Jahrhundert und darüber hinaus ihren Bedarf an sauberer Energie decken kann.

Der Forschungsgegenstand ist die Kernfusion. Deren kommerzielle Nutzung ist einem spöttischen Bonmot zufolge seit Jahrzehnten konstant 30 Jahre entfernt. Doch nun scheint die Marktreife etwas näher zu rücken. Laut einer im Oktober 2021 durchgeführten Umfrage des Branchenverbands Fusion Industry Association (FIA) engagieren sich in dem Sektor inzwischen weltweit mehr als 30 Firmen. Davon haben 18 Angaben zu ihrer Finanzierung gemacht. Demzufolge hatten sie zu dem Zeitpunkt bereits insgesamt mehrere Milliarden US-Dollar eingeworben, die fast ausschließlich aus Privatinvestitionen stammen. Für die rasche Entwicklung waren Fortschritte in der Materialforschung und in der Computertechnik ausschlaggebend. Sie ermöglichen heute wagemutigere technologische Ansätze, die über die etablierten Konstruktionen hinausgehen, auf die nationale und internationale Wissenschaftsbehörden bislang setzen.

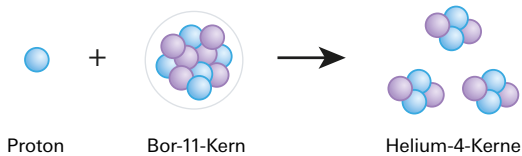
In Culham ist seit Jahrzehnten die britische Fusionsforschung beheimatet. Das neue Projekt soll nun eine Demonstrationsanlage für das Unternehmen General



### Treibstoffmix



In den meisten der geplanten Reaktoren sollen die Wasserstoffvarianten Deuterium und Tritium verschmelzen. Die Fusionsreaktion zündet bei etwa 100 Millionen Kelvin. Dabei wird Energie freigesetzt, außerdem entkommen Neutronen. Die ungeladenen Teilchen lassen sich nur schwer einfangen und können das Material des Reaktors beschädigen.



Ein alternatives Gemisch setzt auf die Fusion von Protonen mit Bor-11. Dabei werden keine Neutronen erzeugt. Die Zündung erfordert allerdings deutlich höhere Temperaturen.

TOMAS MÜLLER; BALL, P.: THE RACE TO FUSION ENERGY, NATURE 599, 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

**VAKUUMTANK** Mehrere riesige Bauteile wie dieses werden das Plasma bei ITER beherbergen.

ITER ORGANIZATION

Fusion aus dem kanadischen Burnaby werden. Der Betrieb soll 2025 beginnen, und das Unternehmen will bereits Anfang der 2030er Jahre Reaktoren zum Verkauf anbieten. Der Geschäftsführer Chris Mowry will mit seiner Firma »erstmalig auf großen Skalen die praktische Umsetzbarkeit für Kraftwerke zeigen«. Es sei denn, die Konkurrenz kommt ihm zuvor.

Die Pläne für den Prototypen von General Fusion veranschaulichen, wie sich Teile des Forschungszweigs gewandelt haben. Inzwischen betreten neben aufwändigen,

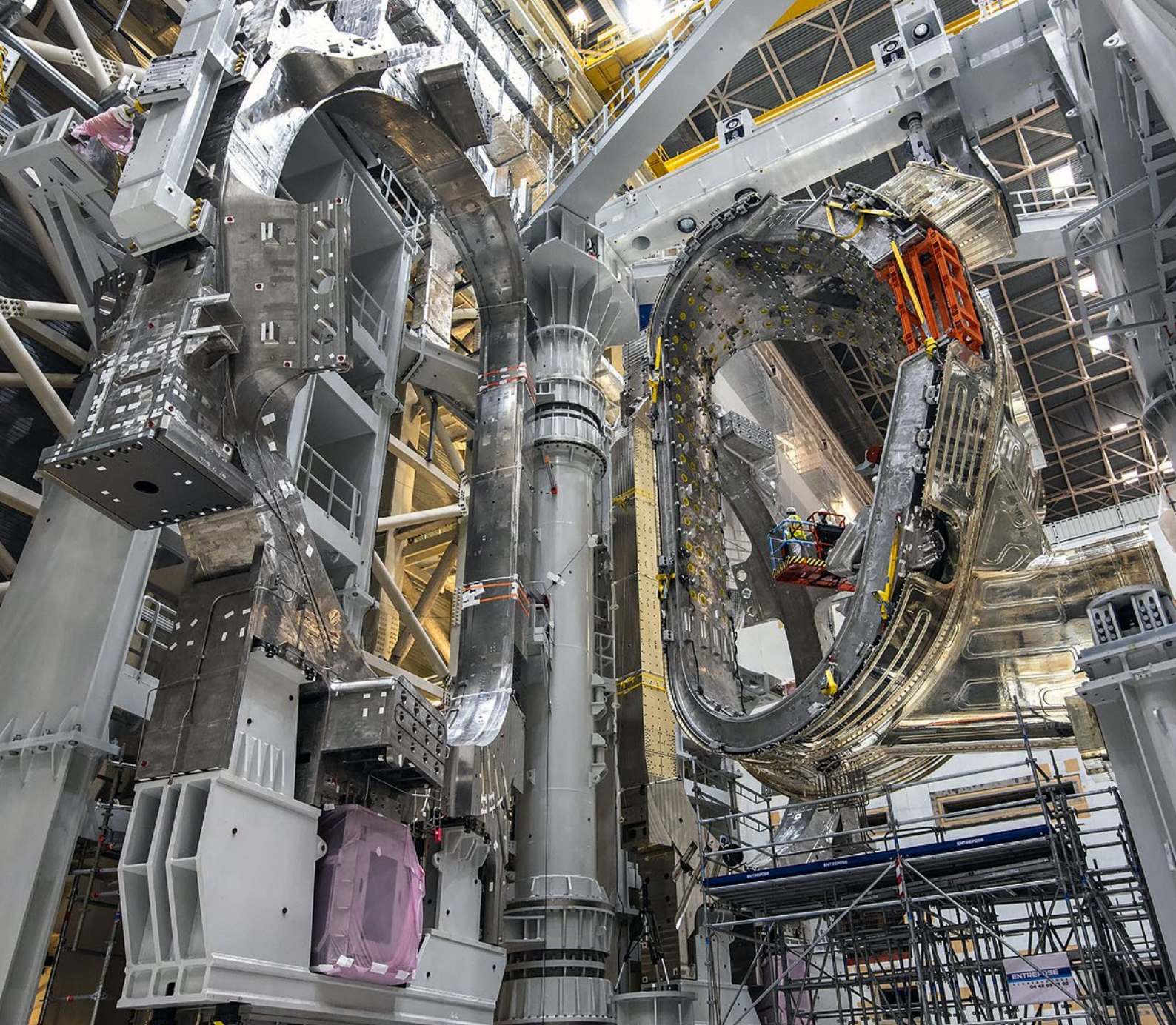


öffentlich finanzierten nationalen oder internationalen Vorhaben zunehmend kleinere, imagebewusste Unternehmen die Bühne, oft mit staatlicher Unterstützung. In dem Feld werden gern Parallelen zur Raumfahrtindustrie gezogen. Auch diese wurde anfangs durch Regierungsprojekte vorangebracht, profitiert nun aber von der Tatkraft und dem Ideenreichtum privater Konzerne, wenngleich vielfach institutionell gefördert. Mowry spricht mit Blick auf Elon Musks Raumfahrtunternehmen vom »SpaceX-Moment für die Kernfusion«.

Entsprechend wittern Investoren ihre Chance auf Rendite. So gehören Konzerne wie Google und die Investmentbank Goldman Sachs zu den Geldgebern des Unternehmens TAE Technologies im kalifornischen Foothill Ranch. Es

hatte im April 2021 schon rund 880 Millionen Dollar eingesammelt. »Unternehmen bauen inzwischen auf dem Niveau dessen, was bisher Regierungen geleistet haben«, fasst Bob Mumgaard, der Geschäftsführer der US-Firma Commonwealth Fusion Systems, den Trend zusammen.

Ähnlich wie sich gerade ein privater Raumfahrtsektor etabliert, halten Branchenbeobachter kommerzielle Fusionskraftwerke innerhalb eines Jahrzehnts für möglich. TAE-Geschäftsführer Michl Binderbauer gibt sich optimistisch: »Die Chancen stehen gut, in weniger als zehn Jahren so weit zu sein.« Im FIA-Bericht vertrat die Mehrheit der Befragten die Ansicht, in den 2030er Jahren würde bereits irgendwo auf der Welt die Kernfusion Energie ins Stromnetz speisen.



**RIESIGE SPULE** D-förmige Magnete werden einen Teil des Feldes erzeugen, das bei ITER dem Einschluss des Plasmas dient.

Trotz der unbestreitbar guten Aussichten halten Fachleute, die nicht für Privatunternehmen arbeiten, solche Vorhersagen für zu optimistisch. Tony Donné von der Technischen Universität Eindhoven etwa mahnt: »Die Firmen nennen den Zeitrahmen lediglich, um Geldgeber anzulocken. Sie alle haben stets erklärt, bloß rund zehn Jahre von einem funktionierenden Fusionsreaktor entfernt zu sein, und sie tun es weiterhin.« Die britische Plasmaphysikerin Melanie Windridge, die als Kommunikationsberaterin für die Fusionsfirma Tokamak Energy in Culham arbeitet, sieht solche Zeitpläne weniger als Versprechen, sondern vielmehr als Motivation: »Ich halte kühne Ziele für nötig.«

Thomas Klinger vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Greifswald nimmt jedenfalls eine geänderte Stimmung wahr. Er stellt die Rolle der Kernfusion als »einzige Primärenergiequelle im Universum« heraus, die wir noch nicht kontrolliert nutzbar gemacht haben. Den Prozess, der die Sterne antreibt, konnten die Menschen bislang nur in Form der Wasserstoffbombe auf die Erde holen. Seit den 1950er Jahren träumen Ingenieure davon, ihn ebenso für die Stromerzeugung zu erschließen, wie es mit der Kernspaltung in Atomkraftwerken gelungen ist.

Bei letzterem Prozess wird Energie beim Zerfall schwerer Atome wie Uran freigesetzt. Während der Kernfusion hingegen entsteht nutzbare Energie durch die Verschmelzung sehr leichter Atome, in der Regel Wasserstoff. Da sich die positiv geladenen Kerne abstoßen, ist ihre Fusion nur möglich, wenn sie mittels ungeheuer hoher Temperaturen und Drücke genügend nah zusammengebracht werden,

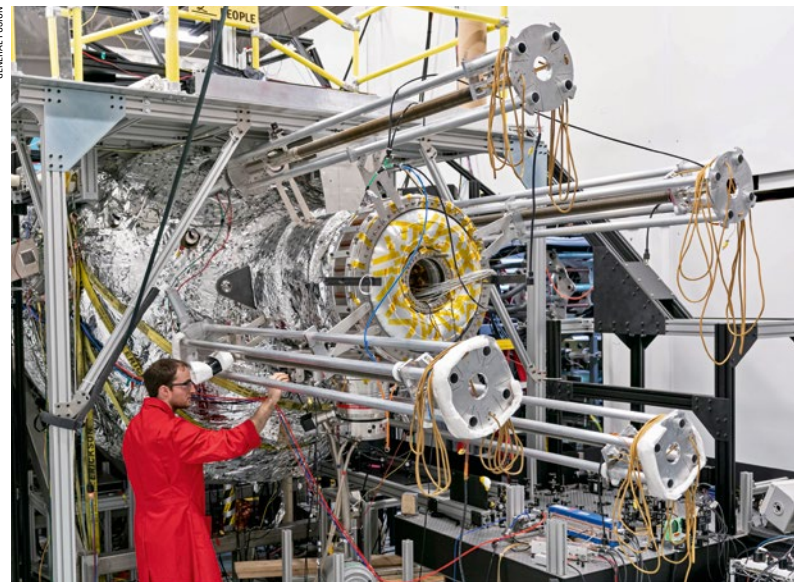


damit sich aus ihnen ein neuer, schwererer Kern bilden kann (siehe »Treibstoffmix«). Die meisten technischen Ansätze verwenden die Wasserstoffisotope Deuterium (D) und Tritium (T), die zusätzlich ein beziehungsweise zwei Neutronen im Kern enthalten. Die Gase werden stark erhitzt und bilden daraufhin ein Plasma, einen besonderen Materiezustand aus geladenen Teilchen. Darin verschmelzen dann die Atomkerne. Im Fall von Deuterium und Tritium sind dafür niedrigere Temperaturen und Teilchendichten als bei normalem Wasserstoff nötig.

### Schwer beherrschbares Sternenfeuer

Bei der D-T-Fusion entsteht Strahlung in Form von Neutronen, aber im Gegensatz zur Kernspaltung bleiben keine langlebigen radioaktiven Abfälle zurück. Deshalb und aus einem zweiten Grund gilt sie als sicherer: Sie kann leicht abgeschaltet werden. Unterschreitet das Plasma kritische Schwellenwerte für Temperatur oder Dichte, stoppen die Kernreaktionen sofort.

Diese Bedingungen zu erreichen, macht die kontrollierte Fusion zugleich so schwierig. Es ist eine enorme Herausforderung, ein Plasma bei Temperaturen von etwa 100 Millionen Grad einzuschließen, viel mehr, als im Zentrum der Sonne herrschen. In der Regel dienen dazu Magnetfelder. Sie halten das Plasma im Reaktor in der Schwebelage, so dass es nicht in Kontakt mit den Wänden kommt, wodurch es schlagartig abkühlen würde. Es treten allerdings immer wieder Instabilitäten auf, die das Einschließen erschweren. Deswegen ist es bislang nicht gelungen, das Plasma und



**PLASMA-INJEKTOR** Ein Techniker von General Fusion arbeitet an einem der Geräte des Unternehmens.

mit ihm die Fusionsprozesse lange genug aufrechtzuerhalten, um daraus mehr Energie zu gewinnen, als man hineinsteckt.

Bis zum Anfang des Jahrhunderts war das eine derart komplexe Herausforderung, dass nur staatlich finanzierte Projekte die Ressourcen dazu aufbringen konnten. Die Vorhaben gipfelten in dem heute weltweit größten Fusionsprojekt, dem Reaktor ITER, der in Südfrankreich gebaut wird und zu dem China, die Europäische Union, Indien, Japan, Korea, Russland und die Vereinigten Staaten beitragen. Er kostet mindestens 20 Milliarden Euro.

Zwar schreitet dessen Bau voran (siehe »Spektrum« 3/2021, S. 66), und für 2025 sind die ersten Testläufe geplant. Allerdings soll die vollständige D-T-Fusion erst 2035 stattfinden und bei einer Einspeiseleistung von 50 Megawatt bloß eine Leistung von 500 Megawatt erbringen, vergleichbar mit dem Block eines Kohlekraftwerks. Da ITER nur Forschungszwecken dient, wird davon nichts ins Stromnetz fließen.

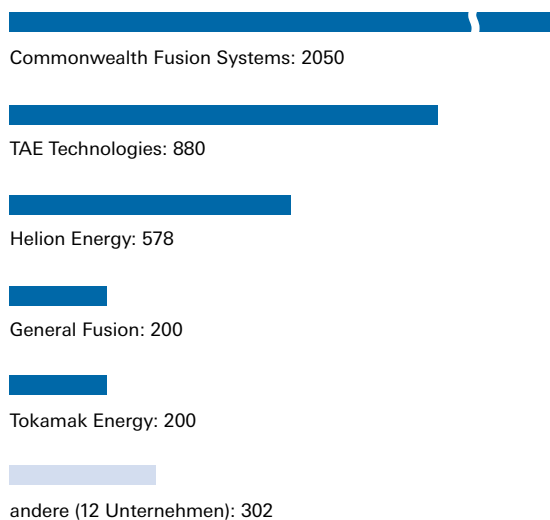
Auf die mit ITER gewonnenen Erkenntnisse könnte eine Reihe weiterer großer Reaktoren folgen. China visiert für die 2030er Jahre den China Fusion Engineering Test Reactor an, ebenso planen sowohl Südkorea als auch die EU den Bau von Demonstrationskraftwerken.

Auf der Suche nach emissionsarmen Energiequellen für die Bewältigung des Klimawandels kommt das alles zu spät, selbst wenn sich die Kernfusion in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts allmählich als ein Bestandteil der Energieinfrastruktur etablieren sollte. Kommerzielle Unternehmen hoffen jedoch, schon früher funktionierende und erschwingliche Reaktoren auf den Markt zu bringen.

Wie bei der Weltraumforschung besteht einer der Vorteile eines privaten Sektors in der größeren Vielfalt an Ansätzen, bei denen auch solche ausprobiert werden, die bei staatlichen Finanzierungsrunden nicht in die engere

## Im Rausch der Fusion

Privatunternehmen, die Fusionsreaktoren entwickeln, konnten sich bis Ende 2021 bereits mehrere Milliarden US-Dollar sichern (Angaben in Millionen US-Dollar).



TOMAS MÜLLER, BALL P. THE RACE TO FUSION ENERGY, NATURE 599, 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



GRETCHEN ERTL, CS/WIP/PSFC, 2021

**RIESENMAGNETE Hochtemperatur-Supraleiter sollen die starken Felder im Reaktor SPARC von Commonwealth Fusion Systems hervorrufen.**

Auswahl kommen. So wird bei ITER ganz konservativ die älteste und erprobteste Methode zum Einschluss des Plasmas weiterentwickelt. In einem so genannten Tokamak halten starke Magnete das Plasma in einem torusförmigen Behälter. Der Strom der elektrisch geladenen Plasmateilchen erzeugt dabei selbst ein Magnetfeld, das zur Eindämmung beiträgt.

Allerdings ist schon lange klar, dass ein Tokamak zwar die einfachste, aber nicht die einzige mögliche Konstruktion ist. Bereits in den 1950er Jahren berechnete der US-Astrophysiker Lyman Spitzer, wie Magnetfelder in einer kompliziert verdrillten Schleife eine magnetische Flasche bilden könnten, die mit Plasma gefüllt werden kann. Das wird als Stellarator bezeichnet. Die Lösung der Gleichungen zur Beschreibung des Teilchenflusses für diese komplexe Geometrie war seinerzeit jedoch zu rechenintensiv. Darum wurde das Konzept nicht weiterverfolgt, nachdem Tokamaks ihre prinzipielle Eignung unter Beweis gestellt hatten.

Als aber von den späten 1980er Jahren an Supercomputer immer stärker Einzug in die Forschung hielten, griffen Ingenieure die Idee wieder auf. Das führte über mehrere Zwischenstufen zum neuesten Stellarator-Projekt am IPP, dem Reaktor Wendelstein 7-X. Bis zu den ersten Tests 2015 verschlang das Unterfangen mehr als eine Milliarde Euro für Bau, Personal und Betrieb. In einem langwierigen Prozess soll von 2022 an herausgefunden werden, ob und wie sich ein Stellarator für den Dauerbetrieb eignen könnte.

Dieser ist der große potenzielle Vorteil von Stellaratoren. Anders als Tokamaks kann in ihnen das Plasma langfristig eingeschlossen werden, und es müssen nicht starke elektrische Strompulse hindurchgeleitet werden, um Instabilitäten zu bändigen. Es ist jedoch völlig offen, ob die Stellarator-technologie in den kommenden Jahrzehnten Einzug in einen Reaktor hält. »Wir haben noch viele grundlegende

Fragen zu beantworten«, sagt Klinger. »Es handelt sich um eine nie da gewesene Art von Maschine, da muss man Geduld mitbringen und Schritt für Schritt vorgehen.« Auch Klinger merkt an, Privatunternehmen würden sich mit Blick auf ihre Investoren zwar kurzfristige Ziele setzen. Das bedeute aber nicht automatisch, dass diese so schnell erreichbar wären.

Einige private Fusionsunternehmen halten am Tokamak-Design fest, allerdings in verkleinerter Form. Beim britischen Unternehmen Tokamak Energy arbeitet ein 165-köpfiges Team an einer kugelförmigen Variante in der Form eines entkernten Apfels. Mit einem Durchmesser von 3,5 Metern wird er um ein Vielfaches kompakter sein als der Stahltank von ITER, der inklusive der ihn umgebenden Kühlapparaturen fast 30 Meter breit und hoch sein wird. Auch einige staatlich finanzierte Projekte erwägen die kugelförmige Bauweise. So will die britische Kernenergiebehörde UKAEA mit dem Projekt STEP (Spherical Tokamak for Energy Production) einen Prototyp bauen, die bis 2040 mindestens 100 Megawatt in das nationale Stromnetz einspeisen soll.

Der Schlüssel zu solchen Entwürfen ist eine neue Generation leistungsfähiger Magnete. Sie bestehen aus Hochtemperatur-Supraleitern und erzeugen wesentlich stärkere Felder als die herkömmlichen supraleitenden Magnete, die bei ITER verwendet werden. Damit ermöglichen sie eine völlig andere Herangehensweise, nicht nur wegen der Feldstärke. Herkömmliche Supraleiter benötigen eine Heliumkühlung. Technisch gesehen ist das ein Albtraum, denn flüssiges Helium hat eine verschwindend geringe Viskosität und entweicht durch jeden noch so kleinen Riss im Kreislauf. Hochtemperatur-Supraleiter lassen sich hingegen mit flüssigem Stickstoff kühlen, der billig sowie einfacher zu handhaben und zu speichern ist.

**Mit vielfältigen Strategien zur Fusion**

Sowohl Tokamak Energy, die dafür mit der europäischen Großforschungseinrichtung CERN in der Nähe von Genf zusammenarbeitet, als auch Commonwealth Fusion Systems setzen auf die neuartigen Magnete. Letztere Firma gab im August 2021 bekannt, die Magnete in der für ihre Tokamaks benötigten Form hergestellt zu haben – »im Zeit- und Kostenplan«, wie Mumgaard stolz anmerkt.

Commonwealth Fusion Systems ist eine Ausgründung des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge. Klinger hält das seit 2018 operierende Unternehmen für die »vielversprechendste, wertvollste und am besten durchdachte privatwirtschaftliche Initiative« in dem Sektor. Es arbeitet gemeinsam mit dem MIT an einer Anlage, die mehr Energie freisetzt, als ihr zugeführt wird. Der SPARC genannte Reaktor entsteht in Devens, Massachusetts. Er soll laut Mumgaard bis Ende 2025 in Betrieb sein und rund 100 Megawatt erzeugen.

First Light Fusion hingegen, das 2011 aus der britischen University of Oxford hervorgegangen ist, verfolgt eine andere Strategie, die so genannte Trägheitsfusion. Hier wird das Plasma nicht von Magnetfeldern fixiert, sondern durch eine Stoßwelle auf die für die Fusion erforderliche enorme Dichte komprimiert. Das Plasma behält seine Form nur für

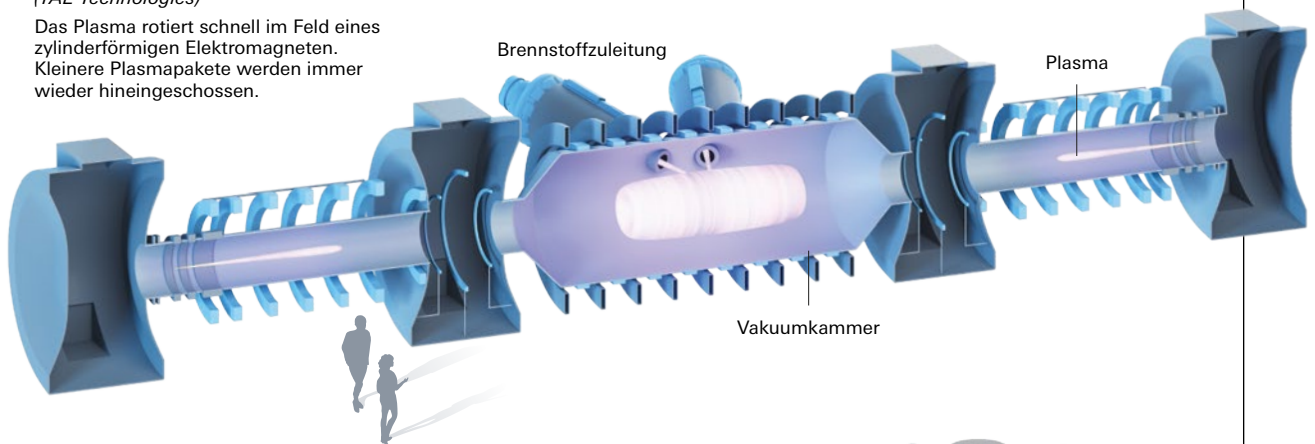
## Reaktortypen

Privat und öffentlich finanzierte Forschungsvorhaben entwickeln verschiedene Arten von Fusionsreaktoren. Allen gemeinsam ist ein Plasma aus geladenen Teilchen, das bei extrem hohen Temperaturen eingeschlossen werden muss. Dort verschmelzen die enthaltenen Atomkerne und setzen Energie frei. Eine Auswahl fünf führender Konzepte verdeutlicht, wie unterschiedlich die Herangehensweisen sind.

### Linearreaktor mit kollidierenden Strahlen

(TAE Technologies)

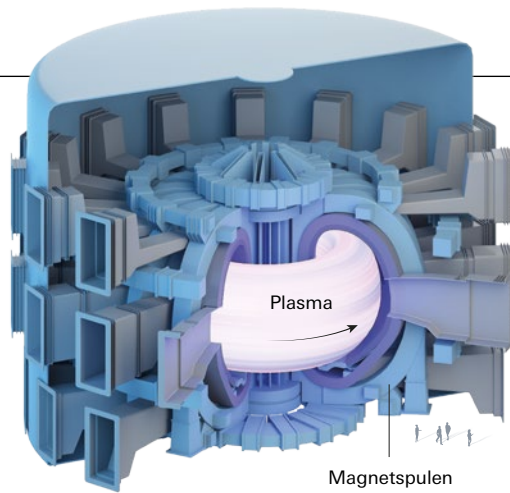
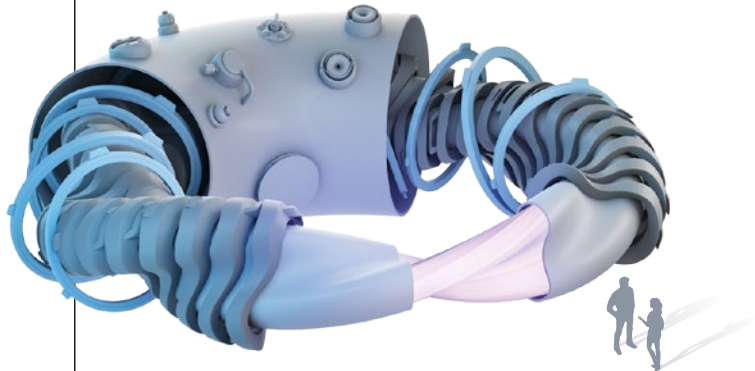
Das Plasma rotiert schnell im Feld eines zylinderförmigen Elektromagneten. Kleinere Plasmapakete werden immer wieder hineingeschossen.



### Stellarator

(Wendelstein 7-X)

Magnetspulen mit speziell berechneter, individueller Form schließen ein kompliziert verdrehtes Plasma ein. In dieser dreidimensionalen Anordnung bleibt es besonders lange stabil.



### Tokamak

(ITER und weitere Anlagen)

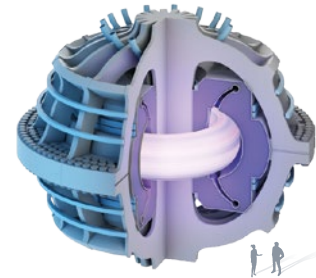
Supraleitende Magnetspulen halten das Plasma in einem torusförmigen Vakuumgefäß. Ein Kühlkreislauf mit flüssigem Helium nimmt die abgegebene Wärmeenergie auf.

Magnetspulen

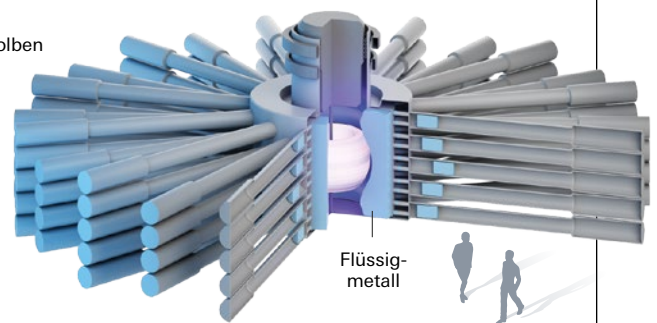
### Mini-Tokamak

(Tokamak Energy, Commonwealth Fusion Systems und andere)

Magnete aus Hochtemperatur-Supraleitern erzeugen stärkere Felder und können leichter gekühlt werden. Das erlaubt die Konstruktion kompakterer Tokamaks.



Kolben



Flüssigmetall

### Magnetized Target Fusion

(General Fusion)

Das Plasma befindet sich in einem Hohlraum inmitten von sich drehendem Metall. Dieses wird schnell von Kolben zusammengedrückt, woraufhin die Dichte im Plasma steigt und die Fusion einsetzt.

den Bruchteil einer Sekunde allein durch seine Trägheit, bevor es sich wieder ausdehnt und dabei Energie abgibt. Das Konzept gibt es bereits seit den 1950er Jahren, und es wird seit einem Jahrzehnt in der US-amerikanischen National Ignition Facility (NIF) am kalifornischen Lawrence Livermore National Laboratory untersucht. Dort werden erbsengroße Kunststoffkapseln mit D-T-Brennstoff mit nur Nanosekunden dauernden Laserpulsen beschossen. Gelegentliche Erfolgsmeldungen bezüglich Verbesserungen bei der Energieausbeute bringen das NIF zwar immer wieder in die Schlagzeilen, aber der Prozess dient vor allem der Grundlagenforschung und hat eher keine kommerzielle Zukunft.

Im Gegensatz dazu erzeugt First Light Fusion die komprimierende Stoßwelle nicht durch Laser, sondern durch eine elektromagnetische Kanone, die ein kleines Projektil auf ein Ziel mit Wasserstoffisotopen schießt. Das Unternehmen hält die Einzelheiten geheim, hat aber erklärt, das Material für eine Fusion auf eine Geschwindigkeit von 50 Kilometern pro Sekunde bringen zu müssen. Das ist doppelt so schnell wie bei derzeitigen Stoßwellenexperimenten möglich.

General Fusion verfolgt wiederum einen anderen Ansatz, der die Fusion mittels magnetischen Einschlusses und die Trägheitsfusion kombiniert. Bei der »Magnetized Target Fusion« wird das Plasma langsamer zusammengedrückt, zum Beispiel mit Hilfe von Kolben, während ein Magnetfeld das Entweichen verhindert. Die Idee stammt aus den frühen 1970er Jahren und sucht nach einem optimalen Kompromiss zwischen den Strom fressenden starken Magnetfeldern, die bei einem Tokamak erforderlich sind, und den energieintensiven Stoßwellen, Lasern oder anderen Methoden, die zur schnellen Kompression des Plasmas bei der Trägheitsfusion verwendet werden.

Bei der Konstruktion in Culham soll eine Zentrifuge eine mit geschmolzenem Blei und Lithium gefüllte Kammer drehen. Die Bewegung erzeugt einen Hohlraum im Zentrum, in dem das Plasma untergebracht wird. Ein Kolbensystem presst weiteres flüssiges Metall in die Kammer und komprimiert so im Verlauf einiger zehn Millisekunden das Plasma. Die Fusion setzt ein; dann wird der Druck zurückgenommen. Das Ganze wiederholt sich etwa einmal in der Sekunde.

Ein besonders interessanter Aspekt des Reaktors ist die Art und Weise, wie er den radioaktiven Brennstoff Tritium erzeugt. Dieser ist eine sehr teure Ressource, die nur während Kernreaktionen entsteht und schnell wieder zerfällt. Bei ITER und anderen Konzepten wird Tritium hergestellt, indem aus dem Reaktor entweichende Neutronen auf ein »Blanket« aus Lithium treffen. Solche Metallpaneele kleiden die Innenseite des Reaktors aus. Beim Entwurf von General Fusion treffen Neutronen auf Lithium, das in dem komprimierenden, flüssigen Metall enthalten ist. Dabei hat das Unternehmen die größten Herausforderungen erst in den letzten Jahren gemeistert. Die Ingenieure haben herausgefunden, wie das Plasma lange genug stabil bleiben könnte, um komprimiert zu werden, und wie sich die Hülle aus flüssigem Metall hinreichend schnell und gleichmäßig zusammendrücken lässt. Dennoch will General Fusion nach der für 2025 geplanten Inbetriebnahme der Demonstrati-

onsanlage schon bis Anfang der 2030er Jahre Energie ins Netz speisen.

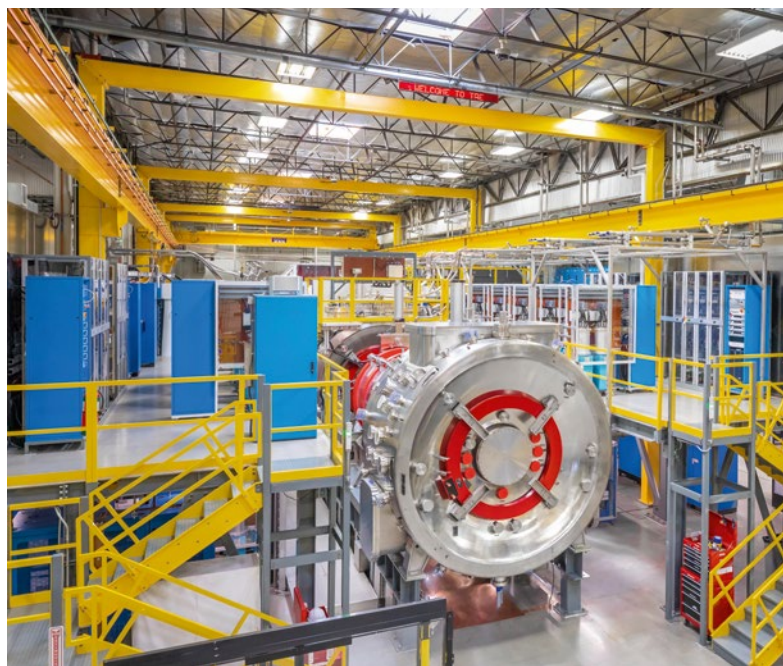
TAE Technologies hat in mancher Hinsicht sogar ein noch kühneres Konzept. Die Firma verzichtet gänzlich auf Deuterium und Tritium und nutzt stattdessen Bor-11-Atome sowie Kerne des gewöhnlichen Wasserstoffs, Protonen. Die Idee stammt vom kanadischen Plasmaphysiker und Mitgründer Norman Rostoker. Die so genannte p-11B-Fusion erfordert mit etwa einer Milliarde Kelvin zehnmal höhere Temperaturen als die D-T-Fusion. Allerdings benötigt die Reaktion kein knappes Brennstoffmaterial und erzeugt keine schwer einzudämmenden Neutronen, welche die Reaktor Umgebung beschädigen könnten. Das sollte die Wartungskosten minimieren und nachhaltigeres Wirtschaften ermöglichen, hofft Binderbauer.

### Milliardenwetten auf das beste Konzept

Beim Gerät von TAE Technologies wird das Plasma in einem Magnetfeld eingeschlossen, das von einer zylindrischen Spule erzeugt wird. Innerhalb dessen rotiert das Plasma um die zentrale Achse; das ruft wie bei einem Kreisel eine inhärente Stabilität hervor. Für den Einschluss müssen keine starken Magnetfelder von außen angelegt werden, denn diese produziert das sich drehende Plasma größtenteils selbst. Um es in Rotation zu halten, tragen tangential hineingeschossene Strahlen aus Boratomen zum Drehimpuls bei, ähnlich wie Schläge mit der Schnur einen Peitschenkreisel antreiben.

Das Unternehmen untersucht den Aufbau seit 2017 mit einem Testsystem und arbeitet inzwischen am Bau eines Geräts namens Copernicus, das mit Plasmen aus normalem Wasserstoff oder mit anderen nicht fusionierenden Atomen

### TESTREAKTOR In einer Halle von TAE Technologies steht die Anlage »Norman«.





**NORMANS  
INNENLEBEN** Ein  
Laserstrahl im  
Reaktorgefäß dient  
zur Justierung.

betrieben wird. Das vermeidet die Erzeugung von Neutronen. Mit Computersimulationen soll dann eine Hochrechnung zu den Energien möglich werden, die mit echtem Fusionsbrennstoff erreichbar wären. Wenn TAE Technologies die für die D-T-Fusion maßgebenden Bedingungen herstellen kann, soll die Technologie an andere Unternehmen lizenziert werden. Das hofft die Firma bis etwa Mitte des Jahrzehnts zu schaffen. Binderbauer bezeichnet Copernicus als notwendige Brücke zu den für die p-11B-Fusion erforderlichen Temperaturen. »Wir sind davon überzeugt, die Milliarden-Grad-Grenze zu erreichen«, gibt er sich optimistisch.

Unter den zahlreichen privaten Fusionsunternehmen nimmt Helion Energy in Everett im US-Staat Washington eine besondere Rolle ein. Im November 2021 gab das Unternehmen eine erfolgreiche Finanzierungsrunde in Höhe

von 500 Millionen Dollar bekannt. Helion Energy will Strom direkt aus der Kernfusion gewinnen. Üblicherweise soll die entstehende Hitze lediglich wie bei allen konventionellen Kraftwerken Flüssigkeiten erwärmen und Turbinen antreiben. Bei dem neuen Konzept werden dagegen entlang der Strecke eines lang gezogenen Reaktors zwei Plasmen zusammengeschossen. Die Zone der Verschmelzung wird dann schnell mit Magnetfeldern komprimiert. Bei der Fusion dehnt sich das Plasma aus, und sein Magnetfeld wechselwirkt mit dem des Reaktors. Das induziert einen elektrischen Strom. Helion will ein Gemisch aus Deuterium und Helium-3 nutzen, bei dem keine Neutronen als Nebenprodukt entstehen würden. Helium-3 selbst müsste jedoch durch andere Fusionsreaktionen erzeugt werden. Der Demonstrationsreaktor des Unternehmens soll bis 2024 in Betrieb gehen.

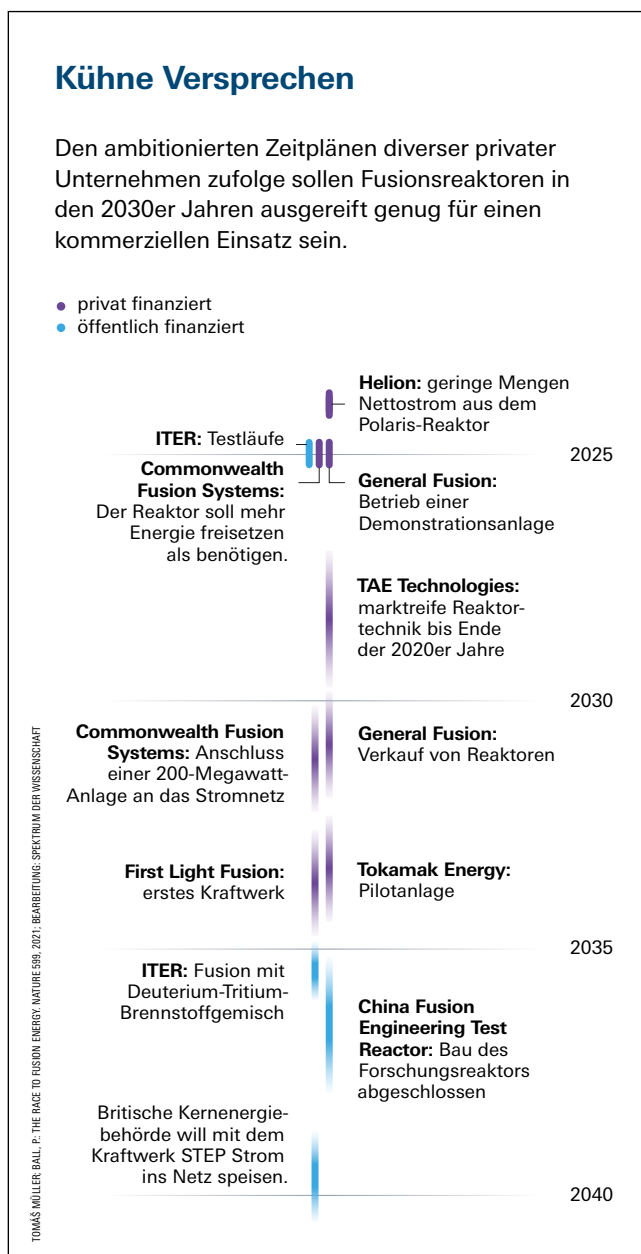
Die von Privatunternehmen gebauten Reaktoren sind kleiner als die ITER-Projekte und entsprechend günstiger. David Kingham, Mitgründer von Tokamak Energy, geht von Geräten im Wert von einer Milliarde Dollar aus, und Binderbauer hält Systeme für etwa 250 Millionen Dollar für möglich. Das Ziel sind kleine Fusionsreaktoren, die an die bestehenden Stromnetze angeschlossen werden könnten oder die sich von besonders energieintensiven Branchen wie der Metallverhüttung direkt nutzen ließen.

### Belebende Konkurrenz

Fusionsexperte Tony Donné mahnt allerdings zur Vorsicht, was die Aussichten angeht, denn am Markt agierende Firmen »beschreiten im Vergleich zu öffentlich finanzierten Projekten aggressivere Zeitpfade, tragen aber ein viel höheres Risiko eines Scheiterns«. Dennoch bekräftigt TAE Technologies, noch auf dem Weg zu sein, den es Mitte der 2010er Jahre eingeschlagen hat (siehe »Spektrum« 2/2017, S. 60), nämlich bis etwa Ende des Jahrzehnts einen Fusionsreaktor zur Marktreife zu bringen.

So gibt sich Donné trotz seiner Skepsis versöhnlich: »Ich sehe den Aufschwung privater Fusionskonzerne als ein gutes Zeichen. Es kann für beide Seiten von Vorteil sein, wenn öffentliche und kommerzielle Projekte eng miteinander verbunden sind.« Das ist sicherlich der Fall. Die Fusionsindustrie baut nicht nur auf jahrelange staatliche Investitionen in Kooperationen wie ITER, sondern sie profitiert obendrein von Regierungen, die in der konkreten Unterstützung der eigenen Vorhaben einen Wert sehen.

Mowry hält solche öffentlich-privaten Partnerschaften für den Weg der Zukunft, so wie es bei den COVID-19-Impfstoffen der Fall war. Er meint dazu: »Die Kernfusion ist der Impfstoff gegen den Klimawandel.« Auch Windridge unterstreicht, die Pandemie hätte gezeigt, »was machbar wird, wenn die Mittel vorhanden sind. Wenn wir ein solches Engagement im Energiebereich hätten, wäre es unglaublich, was wir alles erreichen könnten.« ◀

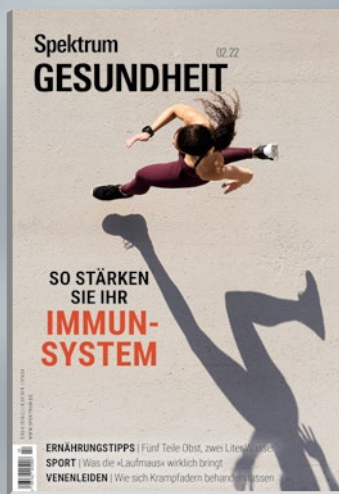


nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
 Nature 599, S. 362–366, 2021

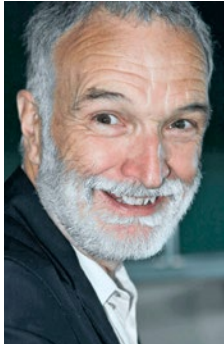
# Unsere Neuerscheinungen

Ob Naturwissenschaften, Raumfahrt oder Psychologie:  
Mit unseren Magazinen behalten Sie stets den Überblick  
über den aktuellen Stand der Forschung



Informationen und eine Bestellmöglichkeit  
zu diesen und weiteren Neuerscheinungen:  
[service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de) | Tel. 06221 9126-743  
[Spektrum.de/aktion/neuerscheinungen](https://www.spektrum.de/aktion/neuerscheinungen)

# SCHLICHTING! FINGERSCHNIPPEN MIT KNALLEFFEKT



**Beim Zusammendrücken von Daumen und Mittelfinger wird Energie elastisch gespeichert und schließlich schlagartig freigegeben.**

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

» [spektrum.de/artikel/1974562](http://spektrum.de/artikel/1974562)

**Von einem gewissen Punkt an gibt es keine Rückkehr mehr.**

Franz Kafka (1883–1924)

► Das Fingerschnippen ist vermutlich so alt wie die Menschheit. Das visuell-akustische Signal, das zwischen Mittelfinger und Daumen einer Hand erzeugt wird, lässt sich beispielsweise bereits bei den alten Griechen nachweisen, wie ein bemaltes Gefäß von zirka 320 v. Chr. bezeugt. Die Geste ist unvermindert populär, auch wenn sich der Kontext und die Bedeutung mit der Zeit und der Gesellschaft ändern. Heute beordert man auf die Weise kaum noch Bedienstete zu sich, dafür hoffen Schülerinnen und Schüler vorgezogen zu werden, indem sie sich fingerschnalzend melden.

Diese Art der Tonerzeugung wirkt eleganter und müheloser als das laute Händeklatschen. Dort kommt es beim Aufeinandertreffen der Handflächen zu Stoßwellen, die sich durch einen Knall bemerkbar machen. Erstaunlicherweise gelingt das beim Schnippen ebenfalls, obwohl dabei nur zwei Finger mit relativ kleiner Fläche aus sehr kurzer Entfernung zusammengebracht werden. Wie man mit etwas Experimentieren selbst herausfinden kann, entsteht das typische Geräusch nicht etwa auf Grund des als kraftvoll empfundenen Aneinandergleitens von Mittelfinger und Daumen, sondern erst dadurch, dass der Finger auf den Handballen unterhalb des Daumens auftrifft. Der Mechanismus ist überaus wirkungsvoll und ermöglicht große Geschwindigkeiten des Mittelfingers, die zum Auslösen von Schallwellen



COMARPLUS\_M.FABA / GETTY IMAGES / ISTOCK

**EVOLUTIONÄRES ERFOLGSMODELL** Der Daumen liefert der Menschheit ein beispiellos einfaches Instrument zur mühelosen Lauterzeugung.



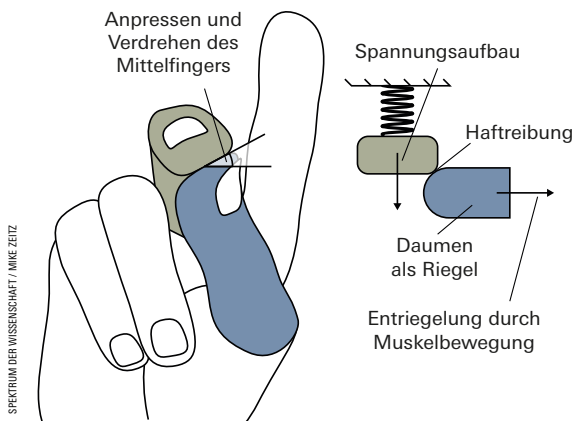
mehr als ausreichen. Auf keine andere Weise lässt sich auf derart begrenztem Raum mit nur zwei Fingern einer Hand ein auch nur annähernd so gut hörbarer Laut hervorbringen.

Welches physikalische Geheimnis steckt hinter dem Schnippen? Beim Ablauf werden zunächst Daumen und Mittelfinger aufeinandergepresst, und zwar mit der Tendenz, sie zu scheren, das heißt sie gegeneinander zu verschieben und innerhalb der Gewebe Spannung aufzubauen. Die Hautoberflächen bleiben am Kontaktpunkt anfangs zusammen, während sich tiefere Schichten der Finger bereits verlagern. Sie werden dabei ähnlich unter Druck gesetzt wie eine elastische Feder, und eine rückwirkende Kraft entsteht. Die Reibungskraft zwischen den Kuppen muss so dosiert werden, dass sie zunächst bremsend wirkt und ein vorschnelles Abgleiten unterbindet. Das funktioniert nur mit passend beschaffenen Oberflächen. Mit nassen oder fettigen Fingern gelingt Schnippen daher kaum.

Schließlich überschreitet die auf Daumen und Mittelfinger ausgeübte Scherkraft ein kritisches Maß. Sie wird größer als die Haftreibungskraft, und es kommt zum abrupten Übergang zur Gleitreibung. Das setzt die gesamte elastische Spannenergie plötzlich frei. Dadurch wird der Mittelfinger stark beschleunigt und trifft mit enormer Rotationsgeschwindigkeit auf den Ballen unterhalb des Daumens. Bis zu dem Auslösepunkt kommt es sehr auf die intuitiv ausgeübte, subtile Kontrolle des Drucks zwischen Daumen und Mittelfinger an.

Vier US-Forscher um Raghav Acharya vom Georgia Institute of Technology in Atlanta haben die Details des Fingerschnippens experimentell und theoretisch näher untersucht. In ihrer im November 2021 veröffentlichten

**FEDERENDE FINGER** Stark abstrahiert entspricht die Mechanik des Schnippens einem Apparat, bei dem eine Feder immer mehr zusammengedrückt wird. An deren Ende befindet sich eine Masse (der Mittelfinger), die ein Riegel (der Daumen) zurückhält, bis die Kraft groß genug ist. Durch die Entriegelung wird die Masse stark nach unten beschleunigt.



Analyse stellten sie mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera fest, dass dabei Rotationsgeschwindigkeiten von 7800 Grad pro Sekunde erreicht werden, was 1300 Umdrehungen pro Minute entspricht. Der ganze Vorgang dauert nur etwa sieben Millisekunden und ist damit 20-mal schneller als ein Augenblinzeln. Überhaupt können wir kaum eine andere Bewegung derart explosiv ausführen. Hinsichtlich der Drehgeschwindigkeit erreicht ein professioneller Baseballspieler zwar noch leicht höhere Werte, aber was die Beschleunigungen angeht, sind diese beim Fingerschnippen den Studienautoren zufolge die größten, die je bei Menschen gemessen wurden.

Bei ihren Versuchen variierten die Forscher einige der relevanten Parameter, insbesondere den Reibungskoeffizienten. Dazu verwendeten sie unterschiedliche Materialien wie Gummihandschuhe oder Fingerhüte. Sie wiesen nach: Die anfängliche Energiespeicherung vermittelt der Haftreibung ist für das Phänomen von entscheidender Bedeutung. Eine wesentliche Rolle spielen außerdem die elastischen Eigenschaften der biologischen Gewebe, etwa deren Komprimierbarkeit.

Die Forscher beließen es nicht bei der Dokumentation des realen Prozesses, sondern entwickelten auf Basis ihrer Ergebnisse ein mathematisches Modell des Fingerschnippens. Sie gingen stark vereinfachend davon aus, dass die Wechselwirkung zwischen den beiden Fingern einem Feder-Masse-System entspricht (siehe »Federnde Finger«). Dabei wirkt eine Kraft, die über eine Feder vermittelt wird, durch Reibung auf eine andere Masse ein, die zunächst als Riegel dient. Die Federkraft ist variierbar. Die davon abhängige Reibungskraft führt als Haftreibung zu einer Speicherung elastischer Energie. Diese wird dann beim Entriegeln auf einmal freigesetzt und beschleunigt urplötzlich eine Masse, die an der Feder befestigt ist.

Die Wissenschaftler erhoffen sich auf Basis ihres Modells eine Erklärung für ähnliche Vorgänge im Tierreich. Zum Beispiel schnappen manche Termiten und Ameisen mit ihren Mundwerkzeugen auf vergleichbare Weise. Darüber hinaus könnten die Erkenntnisse die Entwicklung von fein steuerbaren Aktuatoren für technische Anwendungen unterstützen.

Diese Art, Finger aneinander schnalzen zu lassen, ist die effektivste – aber nicht die einzige. Wenn die Hand mit bewusst schlaff gelassener Muskulatur in eine Art Schleuderbewegung versetzt wird, schlägt schließlich der Zeigefinger auf den Mittelfinger auf. Mit etwas Übung erzeugt das ebenfalls ein lautes Geräusch. Vielleicht wäre das ja ein Gegenstand für ein zukünftiges Forschungsvorhaben.

#### QUELLE

**Acharya R. et al.:** The ultrafast snap of a finger is mediated by skin friction. *Journal of the Royal Society Interface* 18, 2021

# GEOMETRIE MATHEMATIK MIT FLIESEN UND BAUKLÖTZEN

**Welche Möglichkeiten gibt es, einen Raum zu kacheln? Eine an diese Frage angelehnte Vermutung blieb 90 Jahre lang unbeantwortet – bis ein Computer sich ihrer annahm.**



**Kevin Hartnett** ist Wissenschaftsjournalist in Columbia (South Carolina).

► [spektrum.de/artikel/1974565](https://spektrum.de/artikel/1974565)

► Vor 90 Jahren stellte Ott-Heinrich Keller (1906–1990) während seiner Dissertation eine inzwischen nach ihm benannte Vermutung auf, die mit der Kachelung von Räumen zu tun hat. Keller war kein Fliesenleger, sondern Mathematiker. Die Räume, denen er sich widmete, gingen deshalb über gewöhnliche dreidimensionale Quader hinaus. Er fing aber mit einem einfachen Beispiel an: Angenommen, man wolle die unendlich große zweidimensionale Ebene mit quadratischen Fliesen bedecken, ohne dass diese sich überlappen oder Freiräume entstehen. Dann müssen die Kanten von mindestens zwei Fliesen vollständig aufeinandertreffen. Die Vorhersage weitete er auf jede beliebige Dimension aus: Füllt man etwa einen zwölfdimensionalen Raum mit zwölfdimensionalen »quadratischen« Kacheln, werden am Ende stets zumindest zwei genau aneinanderstoßen.



## **VIelfACH GESTAPELT** **Das Füllen eines Volumens** **kann verblüffend kompliziert werden.**

Beweisen konnte Keller seinen Verdacht allerdings nicht. Und auch andere Mathematikerinnen und Mathematiker scheiterten: Im Lauf der Jahrzehnte griffen sie die Vermutung immer wieder auf und konnten sie für gewisse Dimensionen sogar belegen. In anderen Fällen zeigten sie hingegen, dass Keller falsch lag. 2002 waren schließlich alle Dimensionen abgearbeitet – nur der siebendimensionale Raum blieb übrig. Erst im Oktober 2019 konnte endlich auch diese letzte offene Frage geklärt werden. Geknackt hatten das Rätsel aber nicht allein Wissenschaftler, sondern Computer. Das Ergebnis ist ein weiteres Beispiel dafür, wie menschlicher Einfallsreichtum in Verbindung mit hoher Rechenleistung einige der schwierigsten Probleme der Mathematik lösen kann.

Die Autoren der Arbeit, Joshua Brakensiek von der Stanford University, Marijn Heule und John Mackey von der Carnegie Mellon University und David Narváez vom Rochester Institute of Technology, brauchten 40 Rechner, um die Aufgabe zu bewältigen. Nach nur 30 Minuten lieferten diese eine kurze Antwort: Ja, die Vermutung trifft in sieben Dimensionen zu. Glücklicherweise muss man das Ergebnis nicht einfach nur so hinnehmen. Der elektronische Output wird von einem langen Beweis begleitet, der erklärt, warum die Hypothese in siebendimensionalen Räumen richtig ist. Zwar ist die Argumentation zu umfangreich, dass Menschen sie verstehen. Aber andere Computerprogramme können sie gesondert überprüfen. Auch wenn man also nicht weiß, wie die Rechner die Kellersche Vermutung im Detail gelöst haben, kann man sicherstellen, dass ihr Resultat richtig ist.

## **AUF EINEN BLICK** **HARTNÄCKIGE SIEBEN**

- 1** Die Kellersche Vermutung besagt, dass jeder lückenlos mit gleich großen Kacheln bedeckte Raum notwendigerweise zwei Fliesen enthält, die eine gemeinsame Kante vollständig teilen.
- 2** Diese Hypothese weitete Keller vor 90 Jahren auf jede beliebige Raumdimension aus. Fachleuten gelang es, alle Fälle zu beweisen oder zu widerlegen – bis auf den siebendimensionalen Raum.
- 3** Indem vier Mathematiker das Problem auf die Graphentheorie übertrugen und mit cleveren Tricks für einen Computer übersetzten, konnten sie nun auch den siebendimensionalen Fall lösen.

Es lässt sich leicht erkennen, dass die Hypothese in zwei Dimensionen wahr ist. Dazu braucht man nur ein Blatt Papier, das man lückenlos mit gleich großen Quadraten bedeckt, ohne dass sich diese überlappen. Wie man schnell feststellt, müssen in diesem Fall mindestens zwei der Schnipsel eine gemeinsame Kante haben. Mit kubischen Bauklötzen lässt sich ebenfalls rasch einsehen, dass die Annahme in drei Dimensionen gilt.

1930 vermutete Keller, diese Beziehung sei für Räume und Kacheln in jeder Dimension richtig. Frühe Ergebnisse untermauerten seine Vorhersage. Er selbst wies 1937 nach, dass die Dimensionen fünf und sechs seine Hypothese erfüllten und vier Jahre später fand sein Kollege Oskar Perron einen entsprechenden Beweis für alle Räume der Dimensionen eins bis sechs.

### **Bis zu welcher Dimension ist die Vermutung wahr?**

Nach weiteren 55 Jahren kam jedoch ein Rückschlag, den der 1990 verstorbene Keller nicht mehr erlebte. Eine neue Generation von Wissenschaftlern fand das erste Gegenbeispiel zur Kellerschen Vermutung: Wie Jeffrey Lagarias und Peter Shor bewiesen, ist die Annahme in zehn Dimensionen falsch. Tatsächlich hatten sie mit dieser Arbeit einen riesigen Fortschritt auf dem Gebiet gemacht. Denn sobald die Hypothese in einer Dimension widerlegt ist, trifft sie zwangsläufig auch in allen höheren nicht zu, wie aus einem mathematischen Argument folgt.

Nach Lagarias' und Shors Beweis waren also nur noch die Dimensionen sieben, acht und neun ungeklärt. Es dauerte weitere zehn Jahre, bis Mackey 2002 zeigen konnte, dass Kellers Verdacht im achtdimensionalen (und somit auch im neundimensionalen) Raum nicht erfüllt ist. Damit blieb nur noch der siebendimensionale Fall offen. Es handelte sich dabei also entweder um die höchste Dimension, in der sich die Vermutung bestätigen lässt, oder die niedrigste, in der sie nicht mehr gilt.

Über die Jahrzehnte, in denen sich die Mathematikerinnen und Mathematiker mit dem Problem beschäftigten, wandelten sich ihre zur Verfügung stehenden Methoden: Perron und Keller benötigten für die ersten sechs Dimensionen lediglich Bleistift und Papier, während Shor und Lagarias in den 1990er Jahren die Vermutung völlig neu formulierten, damit ein Algorithmus sich ihr annehmen konnte.

In Kellers ursprünglicher Form geht es um die Kachelung eines kontinuierlichen Raums, der unendlich ausgedehnt ist. In diesem gibt es unendlich viele Möglichkeiten, unendlich viele Kacheln gleicher Dimension zu platzieren. Computer sind allerdings nicht gut darin, Probleme zu lösen, die unbegrenzte Größen enthalten. Um ihre Fähigkeiten zu entfalten, brauchen sie diskrete, endliche Objekte, die sie untersuchen können. Deshalb schien die Kellersche Vermutung auf den ersten Blick ungeeignet zur Bearbeitung durch Algorithmen.

Doch 1990 fanden die ungarischen Mathematiker Keszthelyi Corrádi und Sándor Szabó eine Möglichkeit, das zu ändern. Wie sie herausfanden, sind einige Fragestellungen zu einem bestimmten endlichen und diskreten Objekt identisch zur Kellerschen Vermutung. Wenn es also gelänge, etwas über diese Strukturen zu beweisen, würde man damit notwendigerweise auch die Hypothese von Keller belegen oder widerlegen. Dadurch konnten Corrádi und Szabó eine geometrische Frage zu unendlichen Kachelungen auf ein einfacheres Problem über die Arithmetik weniger Zahlen reduzieren.

Die Methode der zwei Mathematiker basiert darauf, einen so genannten Keller-Graphen zu erzeugen. Bei Graphen handelt es sich um Netzwerke, die aus einer endlichen Anzahl von Punkten (oder Knoten) bestehen und durch Kanten miteinander verbunden sind. Angenommen, man wollte die Kellersche Vermutung in zwei Dimensionen lösen. Dafür kann man sich 16 Spielwürfel auf einem Tisch vorstellen, wobei bei allen die Seite mit den zwei Augenpaaren nach oben zeigt (die zwei Punkte spiegeln die Tatsache wider, dass man sich mit der Hypothese in zwei Dimensionen befasst). Nun färbt man jeden Punkt mit einer von vier Farben: rot, grün, weiß oder schwarz. Hat man sie einmal koloriert, darf man die Würfel nicht mehr drehen. Die Lage der Punkte auf einem einzelnen Würfel sind nicht austauschbar. Anschließend verbindet man zwei Objekte durch Linien oder Kanten, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind: An der einen Stelle (zum Beispiel oben rechts auf der Würfelseite) haben die Punkte unterschiedliche Farben und an der anderen Position (etwa unten links) sind sie komplementär zueinander gefärbt, also grün und rot oder schwarz und weiß. Wenn beispielsweise ein Würfel zwei rote und der andere zwei schwarze Punkte hat, verbindet man sie nicht. Sie erfüllen zwar das erste Kriterium, aber die Farben sind nicht komplementär. Ein rot-schwarzer und ein grün-grüner Würfel teilen hingegen eine Kante, weil sie beiden Bedingungen genügen (rot und grün sind komplementär und grün und schwarz sind verschieden).

Es gibt 16 Möglichkeiten, zwei Punkte mit vier Farben zu kolorieren. Deshalb arbeitet man mit 16 Würfeln und verbindet diese entsprechend den formulierten Regeln. Die entscheidende Frage, die mit der Kellerschen Vermutung

zusammenhängt, lautet: Gibt es eine Gruppe von vier Würfeln, die alle miteinander verbunden sind?

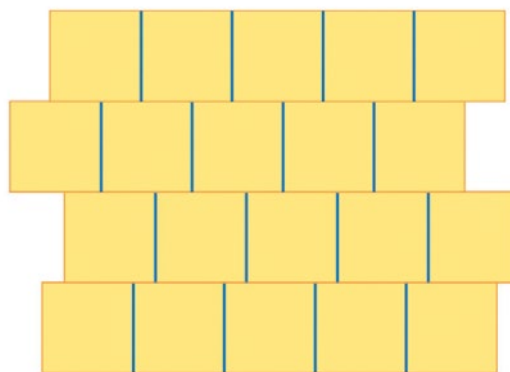
Derart vollständig zusammenhängende Teilmengen innerhalb eines Graphen nennt man »Clique«. Man kann beweisen, dass falls eine solche existiert, die Hypothese von Keller in zwei Dimensionen falsch ist. Doch wie wir bereits wissen, trifft sie für den zweidimensionalen Fall zu. Deshalb wird man in diesem Netzwerk keine Clique aus vier Würfeln finden. Weil Corrádi und Szabó zeigen konnten, dass das geschilderte Cliqueproblem im Keller-Graphen exakt mit der Kellerschen Vermutung übereinstimmt, gilt auch die Umkehrung: Ist man nicht in der Lage, eine entsprechende Clique zu finden, dann ist die Hypothese für den betrachteten Fall wahr.

## Komplexe Kachelung

Die Kellersche Vermutung besagt, dass es immer zumindest zwei Fliesen gibt, die eine Kante vollständig miteinander teilen, wenn man eine Ebene lückenlos und ohne Überlapp kachelt. Gleiches gelte für jeden  $n$ -dimensionalen Raum.

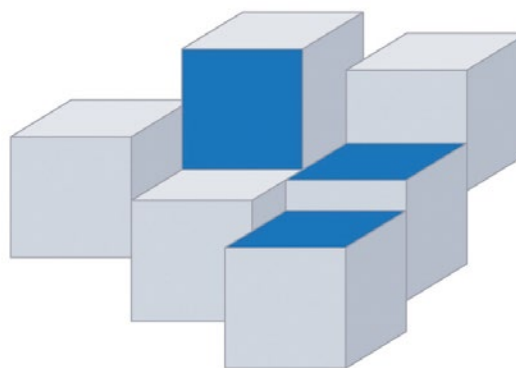
### zweidimensionale Kachelung

In der zweidimensionalen Ebene mit gleich großen quadratischen Fliesen gibt es viele, die vollständig aneinandergrenzen (blaue Kanten).



### dreidimensionale Kachelung

Wenn man den dreidimensionalen Raum mit gleich großen Würfeln lückenlos füllt, wird es zwangsweise mindestens zwei geben, die eine Seite teilen (blaue Fläche).



SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE NACH WIKI/CSML  
EDU/MARIELE/KELLER, MIT FRIEDRICH VON MARJUN HEINE

Die Würfel stellen zwar nicht direkt die Kacheln aus dem ursprünglichen Problem dar, das Keller sich überlegt hatte. Aber es gibt eine gewisse Übereinstimmung zwischen der Positionierung zweier Fliesen zueinander und den verbundenen Würfeln. Wenn zwei Würfel die gleichen Farben haben, entsprechen sie Kacheln, die sich an exakt demselben Ort im Raum befinden. Sind sie hingegen verschieden gefärbt, ohne Komplementärfarben (zum Beispiel falls einer schwarz-weiß ist und der andere grün-rot) zu enthalten, stellen sie überlappende Fliesen dar – was in der Kellerschen Vermutung nicht erlaubt ist. Haben die zwei Würfel eine gleiche und eine komplementäre Farbe (wie rot-schwarz und grün-schwarz), dann teilen sich die dazugehörigen Kacheln eine Kante vollständig. Und schließlich der entscheidende und letzte mögliche Fall: Wenn die zwei Würfel unterschiedlich gefärbt und komplementär sind, steht das für sich berührende Kacheln, die jedoch leicht gegeneinander verschoben sind, so dass ihre Kanten nicht exakt aufeinanderliegen.

### Das Verfahren funktioniert für jede Dimension, doch die Zahlen wachsen rasant

Das heißt, im Graph verbundene Würfel stellen Kacheln dar, die keine vollständige Seite teilen – genau die Art von Anordnung, welche die Kellersche Vermutung widerlegt. Wenn es eine Clique gibt, kann man sich vorstellen, dass die entsprechenden Kacheln eine bestimmte Fläche lückenlos und ohne Überlapp ausfüllen. Sie bilden ein größeres Objekt, das sich vervielfältigen lässt, um letztlich die komplette Ebene abzudecken. Damit wäre die Kellersche Vermutung widerlegt.

Wie Corrádi und Szabó vor etwa 30 Jahren bewiesen, kann man das Verfahren nutzen, um die Hypothese in jeder beliebigen Dimension zu widerlegen. Man muss dafür bloß die Parameter des Gedankenexperiments anpassen. Doch die Variablen wachsen rasant an: In drei Dimensionen benötigt man schon 216 Würfel mit drei Punkten auf einer Seite und sechs Farben. Wieder müssen die Würfel die gleichen Bedingungen wie zuvor erfüllen, damit man sie durch eine Kante verbinden darf. Eine mögliche Clique würde dann aus acht Würfeln ( $2^3$ ) bestehen, die vollständig miteinander verbunden sind. Um die Kellersche Vermutung in  $n$  Dimensionen zu beweisen, verwendet man Würfel mit  $n$  Punkten und mehreren Farben und versucht, eine Clique der Größe  $2^n$  zu finden. Wie im zweidimensionalen Fall kann man sich eine solche Clique als eine Art Super-Kachel (bestehend aus  $2^n$  kleineren Kacheln) vorstellen, die den  $n$ -dimensionalen Raum füllen könnte.

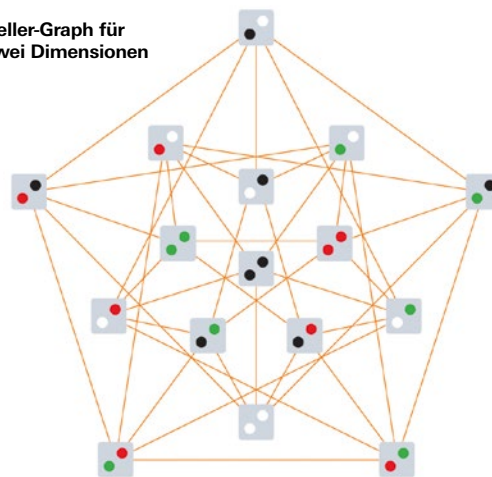
Mackey griff darauf zurück, um die Kellersche Vermutung in acht Dimensionen zu widerlegen. Ihm gelang es, im Keller-Graph eine Clique aus 256 Würfeln ( $2^8$ ) auszumachen. In sieben Dimensionen muss man eine halb so große Struktur aus 128 Würfeln ( $2^7$ ) finden. Falls sie existiert, ist die Hypothese in sieben Dimensionen falsch. Beweist man hingegen, dass es eine solche Clique nicht geben kann, hat man die Vermutung für diesen Fall bestätigt.

Tatsächlich erweist sich die Aufgabe in sieben Dimensionen als extrem schwer. Obwohl die acht- und zehndimensionalen Varianten wesentlich größere Graphen und Cliques

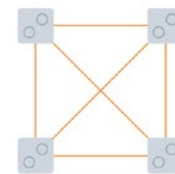
## Unmöglich zu finden

Unten ist ein Keller-Graph für zwei Dimensionen dargestellt. Wenn man eine Clique von vier Würfeln finden kann, die alle miteinander verbunden sind, hätte man die Kellersche Vermutung im zweidimensionalen Fall widerlegt. Da es eine solche Clique aber nicht gibt, ist die Hypothese richtig.

Keller-Graph für zwei Dimensionen



eine vollständig verbundene Clique aus vier Würfeln (ist im oberen Bild nicht enthalten)



SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE, NACH WWW.GS.DUKE.EDU/~MHEUER/KELLER/, MIT FRIEDRICH VON HAYDEN

enthielten, konnten Forscherinnen und Forscher die Räume in einfachere Strukturen aufteilen. Somit ließen sich die Möglichkeiten eingrenzen und man sah sich mit einem simpleren Problem konfrontiert. Das ist für sieben Dimensionen anders. »Sieben ist schwierig, weil sie eine Primzahl ist, was bedeutet, dass man sie nicht in niedrigere Dimensionen aufteilen kann«, so Lagarias. »Wir hatten also keine andere Wahl, als uns mit der gesamten Kombinatorik dieser Graphen zu beschäftigen.«

Die Suche nach einer Clique der Größe 128 dürfte für Menschen eine nicht bewältigbare Aufgabe sein. Aber es ist genau die Art von Frage, mit der man einen Computer betraut, obwohl auch dieser sich dabei schwertut. Tatsächlich ist das Cliquesproblem in der Informatik überaus bekannt: Es handelt sich um ein Paradebeispiel für ein »NP-vollständiges« Problem. Vereinfacht ausgedrückt heißt das, es gibt bisher keinen Weg, die Aufgabe bei wachsender Größe der Clique effizient zu lösen. Hat man hingegen ein Ergebnis, lässt es sich recht einfach auf Richtigkeit prüfen – wie bei einem ausgefüllten Sudoku.

Damit Computer überhaupt nach Cliques suchen können, muss man das Problem in eine maschinengerechte

Darstellung übersetzen. Die Sprache von Algorithmen basiert auf Aussagenlogik. Dabei handelt es sich um eine Art der logischen Argumentation, die festen Regeln folgt und mehrere Einschränkungen enthält, etwa: Wenn A die Eigenschaft B bedingt und A wahr ist, dann ist auch B wahr.

Nehmen wir an, Sie und zwei Freunde planen eine Party. Sie versuchen zu dritt, eine Gästeliste zusammenzustellen, allerdings gibt es zwischen einigen potenziellen Gästen Streitigkeiten, die sie vermeiden möchten. Wenn man beispielsweise Anna einlädt, sollte Kevin auch kommen. Ein Mitplaner könnte vielleicht einwenden, dass Bernhard sich mit Kevin nicht versteht und deshalb nur Kevin oder Bernhard teilnehmen können. Die dritte Mitplanerin möchte hingegen entweder Anna oder Bernhard oder beide ausschließen. Ist es angesichts all dieser Bedingungen möglich, eine Gästeliste zu erstellen, die alle Partyplaner zufrieden stellt?

In der Informatik wird diese Art von Frage als Erfüllbarkeitsproblem (englisch: SAT von satisfiability) bezeichnet. Man löst es, indem man es in eine aussagenlogische Formel packt, die im genannten Beispiel wie folgt aussieht (die Buchstaben A, K und B stehen für die potenziellen Gäste): (A ODER NICHT K) UND (K ODER B) UND (NICHT A ODER NICHT B). Ein Computer wertet das aus, indem er für jede Variable entweder 0 oder 1 einsetzt. Null bedeutet falsch, also nicht eingeladen, und eine Eins steht für wahr.

Es gibt viele Möglichkeiten, der Formel Einsen und Nullen zuzuweisen. Gemäß der Rechenregeln für logische Operatoren wie »ODER« und »NICHT« berechnet der Algorithmus einen Wert von 0 oder 1 für die gesamte Aussage. Ersteres bedeutet, dass nicht alle Bedingungen erfüllt sind. Wenn hingegen 1 herauskommt, dann ist das eine Lösung für die Gästeliste. Der Computer könnte nach dem Durchlaufen der Kombinationen zu dem Schluss kommen, dass es unmöglich ist, jede Anforderung zu erfüllen. Für das genannte Beispiel gibt es jedoch zwei zufrieden stellende Ergebnisse:  $A = 1, K = 1, B = 0$ , demnach sind Anna und Kevin Gäste, während Bernhard nicht kommen darf, sowie  $A = 0, K = 0, B = 1$ , also nur Bernhard ist eingeladen.

Ein Computerprogramm, das solche Aufgaben der Aussagenlogik löst, heißt SAT-Solver. Es untersucht jede Konfiguration von Variablen und liefert eine simple Antwort: Entweder 1 (ja), es gibt einen Weg, die Bedingungen zu erfüllen, oder 0 (nein), es existiert keiner. »Man entscheidet einfach, ob es eine Kombination von wahren und falschen Variablen gibt, damit die gesamte Formel wahr ist. Wenn man das kann, ist die Formel erfüllbar, und wenn nicht, dann nicht«, so Thomas Hales von der University of Pittsburgh.

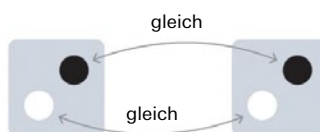
Die Frage, ob man eine Clique der Größe 128 finden kann, ist eine ähnliche Art von Problem. Sie lässt sich auch als aussagenlogische Formel ausdrücken und in einen SAT-Solver einfügen. Man beginnt mit einer großen Anzahl

## Keller-Wörterbuch

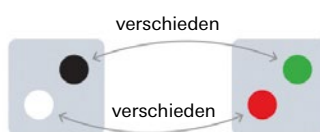
Fachleute haben die Kellersche Vermutung gelöst, indem sie die Anordnung von Kacheln durch das Färben von Würfeln ersetzt haben.

### Konfiguration von Würfeln

gleiche Farben



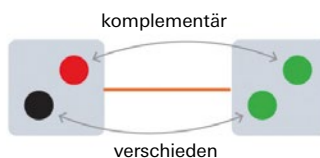
unterschiedliche Farben, keine komplementären



ein Satz mit komplementären und einer mit gleichen Farben



ein Satz mit komplementären und einer mit unterschiedlichen Farben



Würfel sind verbunden.

### Übersetzung in Kacheln

Kacheln befinden sich am selben Ort.



Kacheln würden sich überlappen.



Kacheln teilen eine gemeinsame Kante.



Kacheln berühren sich teilweise, teilen aber keine Kante vollständig.



von Würfeln mit je sieben Punkten und mehreren Farben. Ist es möglich, die Punkte so zu kolorieren, dass man 128 Würfel nach den vorgegebenen Regeln miteinander verbinden kann?

Die Formel, die diese Frage erfasst, ist sehr viel länger als im vorangehenden Beispiel: Sie enthält allein 39000 verschiedene Variablen! Jede kann einen von zwei Werten (0 oder 1) annehmen, woraus sich unvorstellbare  $2^{39000}$  Möglichkeiten ergeben, die Farben auf den Würfeln anzuordnen. Um Kellers Vermutung in sieben Dimensionen zu beantworten, müsste ein Rechner jede einzelne dieser Kombinationen durchgehen und prüfen, ob es eine Clique der Größe 128 gibt – oder deren Existenz für alle Färbungen ausschlie-

ßen. Selbst die schnellsten Computer der Welt bräuchten dafür vermutlich länger, als unser Sonnensystem existieren wird. Doch wie die vier Autoren der neuen Arbeit herausgefunden haben, können die Rechner auch zu einem endgültigen Ergebnis kommen, ohne jede einzelne Möglichkeit prüfen zu müssen.

Mackey erinnert sich an den Tag, an dem das Projekt vor seinen Augen erstmals so richtig Form annahm. Er stand in seinem Büro an der Carnegie Mellon University vor einer Tafel und diskutierte das Problem mit Heule und Brakensiek. Ersterer hatte plötzlich eine Idee, um die Suche so zu strukturieren, dass man sie in einer angemessenen Zeit abschließen könnte. »An diesem Tag war ein echtes intellektuelles Genie am Werk«, erinnert sich Mackey. »Es war, als würde man einen Weltklassesportler im entscheidenden Spielmoment beobachten. Ich habe gerade jetzt eine Gänsehaut, wenn ich nur daran denke.«

### Mit automatisierter Erkennung von Symmetrien zu einer effizienteren Suche

Es gibt viele Möglichkeiten, um die Suche in einem Netzwerk zu beschleunigen. Stellen Sie sich vor, man hat einen Tisch voller Würfel und versucht, 128 davon so anzuordnen, dass sie den Regeln eines Keller-Graphen entsprechen. Vielleicht ordnet man zwölf Stück richtig an, aber man findet keinen Weg, den nächsten Würfel hinzuzufügen. An diesem Punkt könnte man direkt alle Konfigurationen ausschließen, welche die unpassende Ausgangskonfiguration mit den zwölf Würfeln enthalten. »Wenn man weiß, dass die ersten Bausteine nicht zusammenpassen, muss man keine weiteren dazu ansehen. Das verkürzt die Suche im Allgemeinen sehr«, sagt Shor, der jetzt am Massachusetts Institute of Technology arbeitet.

Eine weitere Form der Effizienz ist Symmetrie. Sie ermöglicht es, ein ganzes Objekt zu verstehen, selbst wenn man nur einen Teil davon kennt. Zum Beispiel lässt sich nach einem Blick auf ein halbes Gesicht trotzdem das gesamte Antlitz rekonstruieren. Ähnliche Ansätze funktionieren auch bei Keller-Graphen. Angenommen, man ordnet wieder die Würfel auf einem Tisch an. Vielleicht beginnt man in der Mitte des Tisches und baut eine Konfiguration nach links aus. Man legt vier Würfel hin und stößt auf ein Hindernis – man kommt nicht weiter. Dann lässt sich diese Startkonfiguration ausschließen, samt allen darauf aufbauenden Kombinationen. Doch nicht nur das: Man kann auch die gespiegelte Version dieser Ausgangskonfiguration ignorieren, also die Würfelanordnung, bei der man sich von der Mitte aus nach rechts vorarbeitet.

Die vier Mathematiker haben solche effizienten Methoden auf eine neue Art und Weise genutzt. Insbesondere haben sie Überlegungen zu Symmetrien automatisiert, damit ein Algorithmus sie selbstständig erkennt. In früheren Arbeiten mussten Fachleute die Merkmale praktisch von Hand erarbeiteten und dem Programm übergeben.

So gelang es ihnen, die Suche nach einer Clique der Größe 128 so zu optimieren, dass ihr SAT-Solver statt der ursprünglichen  $2^{39000}$  Konfigurationen nur noch etwa eine Milliarde ( $2^{30}$ ) Kombinationen durchsuchen musste. Damit dauerten die Berechnungen nur eine halbe Stunde. »Die

Computer lieferten das Ergebnis nein, also trifft die Vermutung zu«, so Heule. Denn das heißt, es gibt keine Möglichkeit, 128 Würfel so zu färben, dass sie eine Clique bilden. Somit ist die Kellersche Vermutung in sieben Dimensionen wahr: Jede Anordnung siebendimensionaler Kacheln, die den Raum lückenlos und ohne Überlapp füllen, enthält zwangsläufig mindestens zwei Objekte, die sich eine gesamte Kante teilen.

Tatsächlich lieferten die Rechner wesentlich mehr als eine einsilbige Antwort. Sie untermauerten ihre Schlussfolgerung mit einem langen Beweis, der über 200 Gigabyte groß ist. Dabei handelt es sich nicht einfach um eine Auflistung aller Konfigurationen von Variablen, welche die Computer überprüft haben. Stattdessen ist es ein logisches Argument, das beweist, weshalb die gewünschte Clique unmöglich existieren kann.

Da die Argumentation viel zu lang ist, als dass ein Mensch sie prüfen könnte, übergaben die vier Forscher sie einem formalen Beweisprüfer. Dabei handelt es sich um ein Computerprogramm, das die logischen Schlüsse des Beweises nachzeichnet. Der Algorithmus konnte die Richtigkeit der Folgerung bestätigen. »Die Rechner gehen nicht einfach alle Fälle durch und finden nichts. Stattdessen gehen sie alle Fälle durch und sind in der Lage, einen Beweis zu formulieren, wonach diese Sache nicht existiert«, so Mackey. »Man ist in der Lage, einen Beweis der Unerfüllbarkeit zu schreiben.«

Damit haben verschiedene Algorithmen durch ihr Zusammenwirken nun endlich eine 90 Jahre alte Vermutung geklärt. Das Vorgehen ist ein Paradebeispiel dafür, wie sich die Mathematik in der Zukunft entwickeln könnte: Wissenschaftler übersetzen ein Problem in computergerichte Sprache und überlegen sich einfallreiche Methoden, um Computer bei der Lösungssuche zu unterstützen. Diese spucken dann ein Ergebnis samt Beweis aus, das ein weiterer Algorithmus unabhängig prüfen kann. Die Rolle des Menschen ist dabei immer noch entscheidend, gerade im kreativen Bereich, aber Rechner helfen ihnen erheblich – vor allem dort, wo es um Fleißarbeit geht. ◀

### QUELLEN

**Brakensiek, J. et al.:** The resolution of Keller's conjecture. ArXiv 1910.03740, 2019

**Lagarias, J. C., Shor, P. W.:** Keller's cube-tiling conjecture is false in high dimensions. Bulletin of the American Mathematical Society 27, 1992

**Mackey, J.:** A cube tiling of dimension eight with no facesharing. Discrete & Computational Geometry 28, 2002

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Computer Search Settles 90-Year-Old Math Problem« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



# MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN ECKIGE WELLEN

**Wenn man ein schwingendes Medium in einen etwas exotischen Zustand versetzt und dann der Natur ihren Lauf lässt, verhält es sich zu rationalen Zeitpunkten völlig anders als zu irrationalen. Dieses absolut kontraintuitive Phänomen ist zwar bei Computersimulationen entdeckt worden, findet sich jedoch auch in der Natur wieder.**



**Christoph Pöppe** war Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«, zuständig vorrangig für Mathematik und Informatik.

» [spektrum.de/artikel/1974568](http://spektrum.de/artikel/1974568)

Wie beschreibt man mathematisch die Bewegung eines elastischen Mediums, sagen wir einer schwingenden Saite oder eines Trommelfells? Zwei physikalische Größen spielen entscheidende Rollen: die Trägheit des Mediums und seine Elastizität. Erstere ist dank Newtons Gesetz »Kraft ist Masse mal Beschleunigung« proportional der zweiten Ableitung nach der Zeit. Die Kraft wiederum entsteht dadurch, dass das Material gedehnt wird und bestrebt ist, sich wieder zusammenzuziehen. Sie ist damit eine Größe, die von Ort zu Ort variiert. Nach einigem Herumrechnen – und vereinfachenden Annahmen zur Physik – landet man bei einer so genannten partiellen Differenzialgleichung. Die Unbekannte in dieser Gleichung ist eine Funktion, nennen wir sie  $u$ , die sowohl vom Ort als auch von der Zeit abhängt.  $u(x, t)$  beschreibt die Auslenkung des Mediums aus der Ruhelage im Punkt  $x$  zur Zeit  $t$ ,

**DIE LÖSUNG** Eine Wellenfortpflanzungsgleichung verhält sich überraschend, wenn die Anfangsbedingung ungewöhnlich ist, in diesem Fall eine Stufenfunktion. Falls die Zeit ein rationales Vielfaches von  $\pi$  ist oder nicht, zeigt die Welle ein stückweise konstantes oder chaotisches Verhalten. Hier abgebildet ist von unten nach oben die Lösungsfunktion für die Zeiten  $\pi/8$ ; 0,5;  $19\pi/100$ , 0,7,  $\pi/4$ , 0,9,  $5\pi/16$  und 1,1 über dem Intervall von  $-\pi/2$  bis  $3\pi/2$ .



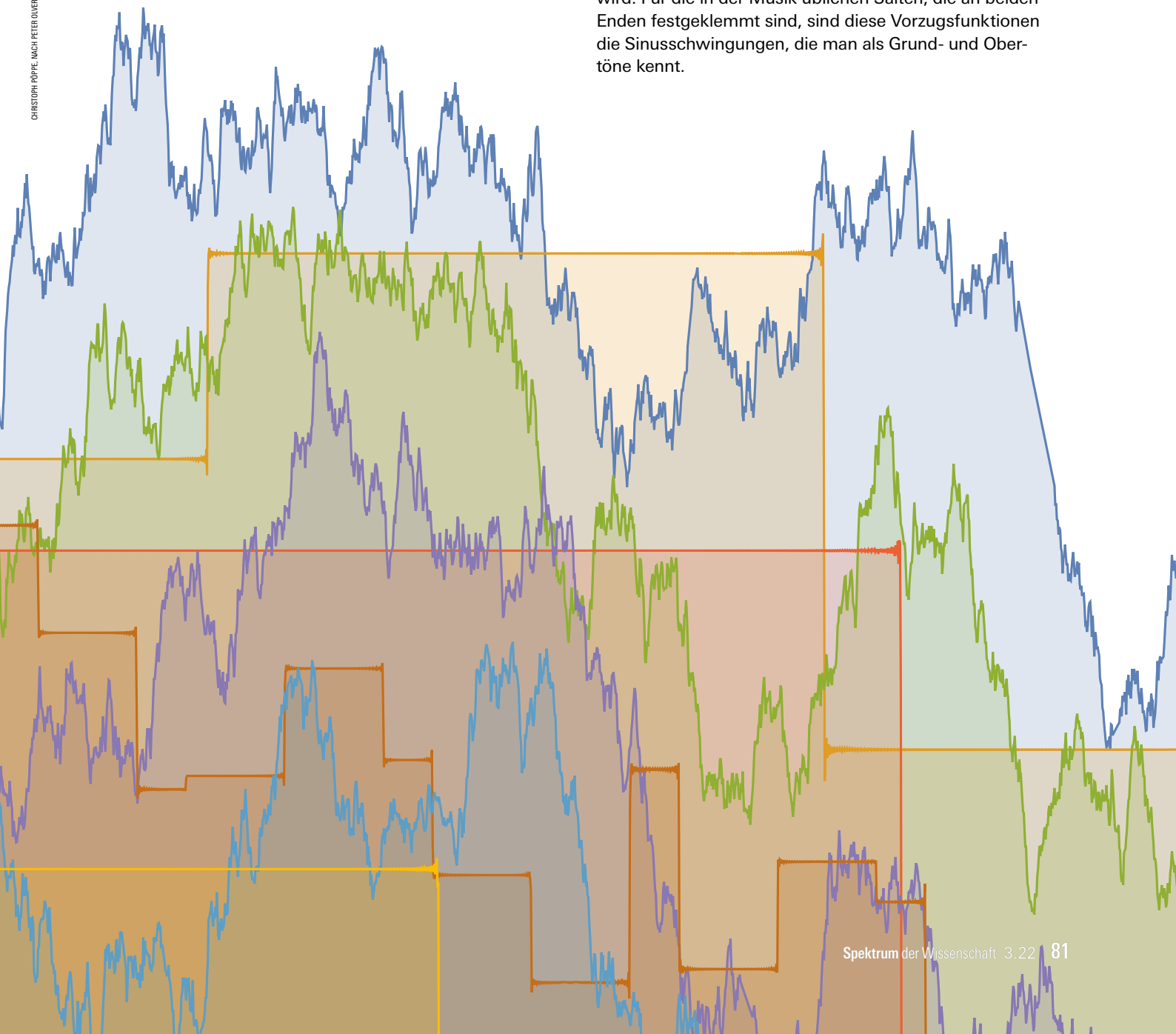
und die Gleichung setzt die räumlichen und die zeitlichen Ableitungen dieser Funktion miteinander in Beziehung.

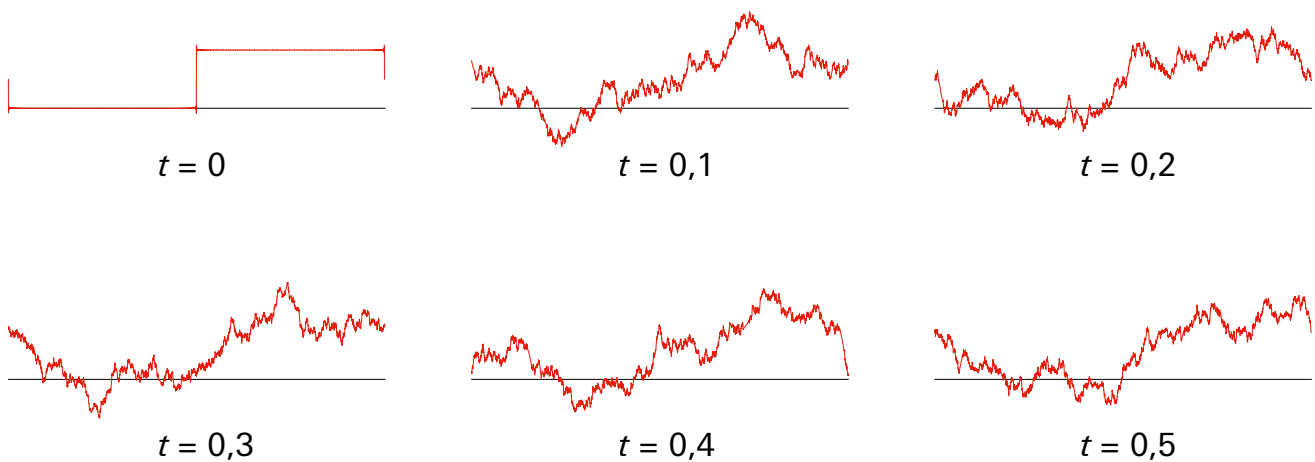
Es versteht sich, dass jede Lösung der Gleichung diese Ableitungen tatsächlich haben muss. Sonst könnte man die Funktion gar nicht in die Gleichung einsetzen, geschweige denn eine Aussage darüber machen, ob es sich um eine Lösung handelt. Eine Funktion, die Kandidat für eine Lösung sein soll, muss also differenzierbar sein, das heißt, die zugehörige Kurve muss in jedem Punkt eine Tangente haben. Und nicht nur das: Sie muss sogar zweimal differenzierbar sein, die Tangente darf sich also von einem Punkt zum nächsten nur allmählich verändern. Eigentlich.

Man kann allerdings eine schwingende Saite auch anzupfen, und zwar richtig punktförmig: an einem Punkt weit aus der Ruhelage auslenken, so dass sie an dieser Stelle einen Knick hat. Die Funktion  $u$ , welche die Gestalt

der Saite beschreibt, hat an dieser Stelle keine Tangente, ist also dort nicht differenzierbar; aber wenn man die Saite loslässt, schwingt sie. Irgendwie gibt es also eine Lösung der Differentialgleichung, die es eigentlich nicht geben dürfte. Was tun?

Die Abhilfe heißt Fourier-Analyse. Unsere Gleichung hat die angenehme Eigenschaft, linear zu sein, das heißt, die Summe zweier Lösungen ist wieder eine Lösung. Man verschafft sich ein vollständiges Sortiment besonders einfacher Lösungen und addiert diese, mit geeigneten Vorfaktoren versehen – auch das tut der Lösungseigenschaft keinen Abbruch –, wieder zu einer Lösung auf. Die Differentialgleichung hat also sehr viele Lösungen; aber man interessiert sich für eine spezielle, und zwar diejenige, die zu einem Anfangszeitpunkt eine vorgegebene Gestalt annimmt. Dann nämlich weiß man, wie sich die zu diesem Zeitpunkt gezupfte Saite oder die entsprechend geschlagene Pauke in Zukunft verhalten wird. Für die in der Musik üblichen Saiten, die an beiden Enden festgeklemmt sind, sind diese Vorzugsfunktionen die Sinusschwingungen, die man als Grund- und Ober-töne kennt.





**FRAKTALÄHNLICHKEIT** Die Lösung der einseitigen dispersiven Wellengleichung  $u_t = u_{xxx}$  auf dem Intervall  $[0, 2\pi]$  mit periodischen Randbedingungen und dem Anfangswert  $u(0,x) = 0$  für  $x \leq \pi$ ,  $u(0,x) = 1$  für  $x > \pi$ , angenähert durch die ersten 1000 Glieder der Fourier-Summe. Der Anfangswert ( $t = 0$ ) wird durch die Fourier-Summe nicht exakt reproduziert: An den Unstetigkeitsstellen »überreibt« die genäherte Funktion den Sprung ein bisschen. Dieses Gibbs-Phänomen ist ein bekanntes Problem der Näherung durch Fourier-Summen.

Bemerkenswerterweise liefern diese Fourier-Summen, also Summen aus Vorzugsfunktionen, mehr, als man bestellt hat. Jede einzelne dieser Funktionen ist so oft differenzierbar, wie die Gleichung es verlangt (sogar unendlich oft), schließlich ist sie eine Lösung. Dasselbe gilt für deren Summen – aber nur für endliche! Mit einer unendlichen Fourier-Summe kann man dagegen ziemlich beliebige Funktionen erzeugen, selbst solche mit Knicken oder sogar Sprüngen.

Damit findet sich auch für eigentlich unzulässige Anfangswerte wie den mit der punktförmig gezupften Saite eine Lösung. Sie ist ebenfalls eigentlich unzulässig; denn der Anfangsknick pflanzt sich im Allgemeinen fort und ruiniert ebenso für zukünftige Zeitpunkte die Differenzierbarkeit. Gleichwohl kommt sie der physikalischen Realität ungefähr so nahe wie eine »glatte«, das heißt hinreichend oft differenzierbare Lösung. Ob ein Knick eine echte Unstetigkeit in der Tangente ist oder doch nur eine sehr scharfe Kurve, sieht man erst, wenn man an die entsprechende Stelle beliebig nah heranzoomt. Tut man dasselbe in der Realität, landet man irgendwann in der Größenordnung einzelner Atome. Dort aber bricht die mathematische Modellierung, die sich das Medium als strukturloses Kontinuum vorstellt, ohnehin zusammen, womit die Frage, wie die Lösung denn »wirklich« aussieht, unbeantwortbar wird.

Diese »schmutzigen« Lösungen sind also nicht unbedingt zu verwerfen, weil sie keine Lösungen im Wortsinn sind. Im Gegenteil: Sie genießen bei den Anwendern sogar eine gewisse Anerkennung, weil sie manche Phänomene einfacher und einleuchtender beschreiben als irgendwelche

hilflosen Versuche, der Theorie zuliebe die Funktionen doch noch glatt zu machen. Für die einfachste Wellengleichung gilt, dass sich eine Anfangskonfiguration, sei sie zulässig oder unzulässig, in unveränderter Gestalt nach beiden Seiten fortpflanzt. Durch Reflexion an den Enden der Saite kann ein Knick wieder zurückkommen und bis in die Ewigkeit hin- und herpendeln. Denn die Reibung, die in der Realität alles ausglättet und am Ende zur Ruhe bringt, ist in dieser einfachsten Gleichung nicht enthalten.

Wenn man nach Lösungen einer Wellengleichung mit irregulären Anfangsbedingungen sucht, sollte man sich also auf einiges gefasst machen, zumindest darauf, dass die Lösung mit der Zeit nicht schöner wird. Aber mit dem, was Peter Olver bei einer fast so einfachen Wellengleichung auf seinem Computer zu sehen bekam, hatte er nicht im entferntesten gerechnet.

### Wenn Wellen Stufen nehmen müssen

Olver, Professor für Mathematik an der University of Minnesota, studierte eine Wellengleichung mit Dispersion. Das heißt, dass Wellen verschiedener Wellenlängen unterschiedlich schnell unterwegs sind – eigentlich nichts Besonderes. Zum Beispiel verhält sich Licht in Materie so, weswegen ein Glasprisma weißes Licht in seine Bestandteile mit unterschiedlichen Wellenlängen zerlegt. Die gedachte Saite, auf der die Welle sich ausbreiten sollte, versah er mit periodischen Randbedingungen. Sie war an den Enden also nicht festgeklemmt, sondern gewissermaßen zum Kreis gebogen, so dass eine Welle, die am rechten Rand hinausläuft, am linken wieder hereinkommt und umgekehrt.

Für das so definierte dynamische System löste Olver das Anfangswertproblem mit einem sehr unphysikalischen Anfangswert: konstant null in der einen Hälfte des Intervalls, konstant eins in der anderen – eine »Stufenfunktion«. Auch für eine solche unstetige Funktion kann man Fourier-Koeffizienten ausrechnen. Erst eine unendliche Fourier-Summe gibt die Stufenfunktion tatsächlich wieder, aber die ersten 1000 Summanden liefern schon eine ganz ordentliche Näherung. Wesentlich weniger zu verwenden ist nicht empfehlenswert, denn die Sinuswellen passen sich zwar sogar einer Stufe an, was ihrer Natur überhaupt nicht entspricht, an der Unstetigkeitsstelle doch sehr zögerlich.

Nachdem die 1000 Fourier-Koeffizienten erst einmal ausgerechnet waren – eine Mühe, der sich Olver ohne eine Computeralgebra-Software, in diesem Fall »Mathematica«, wohl kaum unterzogen hätte –, konnte er die Lösung für jeden Zeitpunkt bestimmen. Näherungsweise, denn er hatte ja nur die 1000 Summanden zur Verfügung.

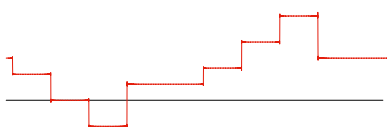
Die ersten Stichproben lieferten eine handfeste Überraschung (siehe »Fraktalähnlichkeit«). Die Funktion, welche die Differenzialgleichung löst, war kein bisschen glatt, aber auch nicht unstetig. Vielmehr sah sie aus wie ein Fraktal: irgendwie zappelig und so, als würde das Gezappel nicht nachlassen, wenn man die Kurve unter immer stärkerer Vergrößerung betrachtet, sondern auf allen Größenskalen im Wesentlichen gleich aussehen.

Das ist die Eigenschaft, die unter dem Namen »Selbstähnlichkeit« oder »Skaleninvarianz« als typisch für Fraktale bekannt ist. Es sah so aus, als ob der große Schmutz, den man mit der stufenförmigen Unstetigkeit in den Anfangszustand des Systems eingebracht hatte, sich unter der Wirkung der Differenzialgleichung überaus fein, aber eben nicht ganz gleichmäßig über das gesamte Intervall verteilt hätte.

Das ist sogar einigermaßen plausibel. Die Fourier-Analyse zerlegt die Stufenfunktion in sehr viele Wellen; die kurzwelligen Anteile sind bedeutender als bei einer glatten Funktion, und Wellen verschiedener Wellenlänge laufen mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Deren Aktionen zusammengenommen können durchaus den Effekt eines Rührmixers haben.

Die größere Überraschung folgte erst später. Bei seinen Stichproben hatte Peter Olver zunächst glatte Zahlen wie 1 oder 1,5 für die Zeitpunkte gewählt, in der Meinung, dass es auf den genauen Zahlenwert nicht so ankomme. Nimmt man aber die Kreiszahl  $\pi$  oder glatte Bruchteile davon, sieht die Lösung völlig anders aus, wie eine Treppe! Auf den

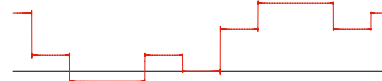
**TREPPE Die Lösung derselben Gleichung mit demselben Anfangswert für die Zeitpunkte, die den ersten Vielfachen von  $\pi/30$  entsprechen.**



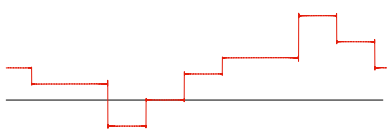
$$t = \frac{\pi}{30}$$



$$t = \frac{\pi}{15}$$



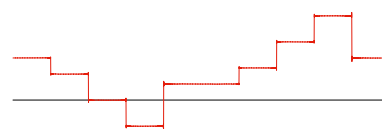
$$t = \frac{\pi}{10}$$



$$t = 2 \frac{\pi}{15}$$



$$t = \frac{\pi}{6}$$



$$t = \frac{\pi}{5}$$

PETER OLVER (WWW.USERS.CS.UMIN.EDU/~OLVER)

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/musik](http://spektrum.de/t/musik)



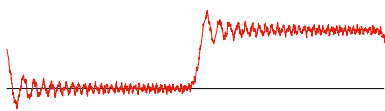
ISTOCK / FRANCESCO CORTICCHIA

einzelnen Stufen ändert sich die Funktion nicht, von Stufe zu Stufe dagegen sprunghaft (siehe »Treppe«).

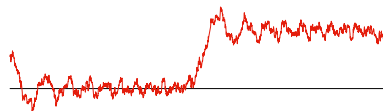
Wie kann das sein, dass es einen Unterschied macht, ob die Uhr ein rationales Vielfaches von  $\pi$  anzeigt oder nicht? Wie findet  $\pi$  überhaupt in die Zeitmessung? Auf die zweite Frage gibt es noch eine relativ einfache Antwort. Olver hat die Länge der gedachten Saite mit  $2\pi$  angesetzt. Auf den Längenmaßstab kommt es zwar überhaupt nicht an, aber mit dieser Wahl sehen die Sinusfunktionen, aus denen man die Fourier-Summe zusammensetzt, besonders einfach aus. Obendrein wird üblicherweise der Zeitmaßstab so gewählt, dass physikalische Konstanten wie die Wellengeschwindigkeit des Mediums den Wert 1 annehmen. Das ändert an der Sache nichts, erspart einem aber das Mitschleppen irgendwelcher Konstanten in der umfangreichen Rechnerei und setzt dabei räumliche und zeitliche Maßstäbe in Beziehung zueinander. So kommt es, dass zum Beispiel  $\pi$  ein bedeutender Zeitpunkt ist.

Aber wieso verwandelt sich die Lösung so plötzlich von fraktal in stückweise konstant und wieder zurück? Wenn man genau hinschaut, geht es nicht ganz so plötzlich. In der Nähe des Anfangszeitpunkts  $t = 0$  wird die Lösung zunächst noch einigermaßen gleichmäßig wellenförmig und geht erst dann ins Chaos über (siehe »Chaos«).

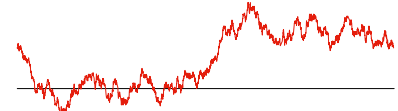
Es bleibt die entscheidende Frage: Warum ist das Verhalten des Systems überhaupt zu gewissen Zeitpunkten stückweise konstant? Eine einleuchtende Begründung gibt es allem Anschein nach nicht, aber immerhin einen beweisbaren Satz. Wenn der Zeitpunkt ein rationales Vielfaches von  $\pi$  ist, also eine Zahl der Form  $(p/q)\pi$  mit einem gekürz-



$t = 0,0001$



$t = 0,001$



$t = 0,01$

### CHAOS Dieselbe Lösung für Zeitpunkte nahe $t = 0$ .

ten Bruch  $p/q$  ( $p$  und  $q$  haben keinen gemeinsamen Teiler), dann kann man das Intervall von 0 bis  $2\pi$  in  $q$  gleich große Abschnitte zerlegen, und die Lösung ist auf jedem Abschnitt konstant.

Der Beweis macht sich zu Nutze, dass es eine Variante der Fourier-Transformation gibt, die nicht auf Funktionen, sondern auf Zahlenreihen anwendbar ist, so als hätte die Funktion nur an endlich vielen gleichmäßig verteilten Punkten der  $x$ -Achse einen Wert – oder eben auf ebenso vielen gleich großen Teilintervallen einen jeweils konstanten Wert. Man rechnet aus, was unter dieser »diskreten Fourier-Transformation« herauskommt, vergleicht die Ergebnisse mit denen des ursprünglichen Problems und stellt Übereinstimmung fest. Es ist einer jener unbefriedigenden Beweise, die zwar jeden Zweifel ausräumen, aber einem kein tieferes Verständnis verschaffen.

### Eine unerhört wechselfreudige Funktion

Nebenher erfahren wir mit diesem Beweis, dass unsere Funktion für alle rationalen Vielfachen von  $\pi$  stückweise konstant ist, auch bei beliebig großem Nenner  $q$ . Da auf der reellen Achse rationale und irrationale Zahlen untrennbar vermischt vorkommen – beliebig nahe jeder rationalen Zahl liegt eine irrationale und umgekehrt –, wechselt die Funktion in allen beliebig kurzen Zeitintervallen unendlich oft zwischen stückweise konstant und chaotisch. Und vor allem kann sie gewissermaßen rationale und irrationale Zeitpunkte voneinander unterscheiden.

Das schlägt nun der physikalischen Intuition vollends ins Gesicht. In der Natur sind alle Messgrößen aus prinzipiellen Gründen nur begrenzt genau; daher ist die Unterscheidung zwischen rationalen und irrationalen Werten sinnlos. Gleichwohl ist aus der Theorie der dynamischen Systeme bekannt, dass rationale Werte mit kleinen Nennern eine Rolle spielen können. Dass etwa die Umlaufzeiten von Jupiter und Saturn im Verhältnis 2:5 stehen, ist durchaus bedeutend für die Stabilität des Sonnensystems. In diesem wie in anderen Fällen verhält sich das System in der Nähe rationaler Werte mit kleinen Nennern deutlich anders als sonst; dort sind die Teilintervalle gewissermaßen so groß, dass man sie sehen kann. Eine stückweise konstante Funktion mit großem Nenner ist dagegen von einer chaotischen auch optisch kaum zu unterscheiden.

Bemerkenswerterweise ist für die Entdeckung des merkwürdigen Phänomens kein besonderer Tiefsinn erforderlich. Mit moderner Hard- und Software ist das Ausrechnen derartiger langer Fourier-Summen ohne Weiteres in der Reichweite eines Amateurs. Olver hat ein Standardverfah-

ren auf eine Standardgleichung angewandt; nur ist anscheinend vor ihm niemand auf die Idee gekommen, die Approximation bis ins tausendste Glied zu treiben.

Ist das Phänomen auf diese spezielle Gleichung beschränkt? Offensichtlich nicht. Nach der ersten Entdeckung hat Olver eine ganze Reihe von Gleichungen durchprobiert, darunter auch physikalisch bedeutsame, und immer wieder, gelegentlich mit Varianten, das wiedergefunden, was inzwischen »dispersive Quantisierung« heißt. Andere Fachleute sind ihm gefolgt und haben für weitere Fälle Beweise gefunden.

Aber das alles hat mit der physikalischen Realität nichts zu tun?! Doch. Dispersive Quantisierung ist in dem alltagslichsten aller Wellenphänomene zu finden, dem sichtbaren Licht. Und kein Geringerer als William Henry Fox Talbot (1800–1877), dem die Welt das Negativ-Positiv-Verfahren in der Fotografie verdankt, hat es bereits 1836 beschrieben. Licht wird durch ein Beugungsgitter in seine spektralen Bestandteile zerlegt; das entsprechende Beugungsbild kann durch eine Sammellinse fokussiert abgebildet werden. Verschiebt man die Linse von dem Experimentaufbau weg, so dass das Bild aus dem Fokus gerät, wird es zunächst erwartungsgemäß unscharf; in größerer Entfernung aber zeigt sich das Beugungsmuster wieder, nicht nur scharf, sondern auch mehrfach, ein Effekt, der sich in verschiedenen Entfernungen wiederholt. Fast zwei Jahrhunderte nach der Erstbeschreibung haben Michael Berry und andere die Sache durchgerechnet. Hier verhält sich das Licht ebenfalls vollkommen verschieden, je nachdem, ob die Linse ein rationales Vielfaches der so genannten Talbot-Entfernung vom Beugungsgitter entfernt ist oder nicht. Die Talbot-Entfernung ist  $d^2/\lambda$ , wobei  $d$  der Abstand der Gitterlinien und  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichts ist. ◀

### QUELLEN

**Berry, M. et al.:** Quantum carpets, carpets of light. *Physics World*, 5. Juni 2001

**Olver, P.J., Sheils, N.E.:** Dispersive lamb systems. *Journal of Geometric Mechanics* 11, 2019

**Talbot, H.F.:** Facts related to optical science. No. IV. *Philosophical Magazine* 9, 1836

### WEBLINKS

<https://www-users.cse.umn.edu/~olver/>

*Peter Olvers Website an der University of Minnesota. Unter »Movies« finden sich Kurzfilme zum Thema.*

[www.youtube.com/c/NatalieSheils](http://www.youtube.com/c/NatalieSheils)

*Olvers Koautorin Natalie Sheils hat auf ihrem Kanal weitere Videos zum Thema veröffentlicht.*

# Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**



Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum** KOMPAKT-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download, optimiert für Tablets, zur Verfügung.

Wählen Sie unter mehr als 300 verschiedenen Ausgaben und Themen. **Jetzt neu:** Beim Kauf von vier Kompakt-PDFs erhalten Sie ein fünftes Kompakt-PDF gratis.



Ausgewählte **Spektrum** KOMPAKT gibt es auch im Printformat!



Hier bestellen:

E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

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

# ARCHÄOLOGIE DER URSPRUNG DES ZÄHLENS

Wenn Archäologen richtigliegen, hatte nicht nur *Homo sapiens* das Zeug zum Zählen. Womöglich rechneten schon die Neandertaler und legten sich dafür »Merkzettel« an.



MIT FRIEDL. GEN. VON FRANCESCO D'ERRICO, D'ERRICO, F. ET AL., FROM NUMBER SENSE TO NUMBER SYMBOLS. AN ARCHAEOLOGICAL PERSPECTIVE. PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY B 373, 2018. FIG. 1; BARRAS, C.: HOW DID ANCIENT HUMANS LEARN TO COUNT? NATURE 594, 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



**Colin Barras** ist Wissenschaftsjournalist in Ann Arbor, Michigan.

► [spektrum.de/artikel/1974571](https://spektrum.de/artikel/1974571)

► Vor etwa 60000 Jahren nahm ein Neandertaler dort, wo heute Westfrankreich liegt, ein Stück Tierknochen und ein Steinwerkzeug in die Hand. Er ritzte neun ungefähr gleichartige, parallele Kerben in den Knochen – gerade so, als ob sie etwas bedeuten sollten.

Was genau, damit beschäftigt sich Francesco d’Errico von der Universität de Bordeaux. Im Lauf seiner Forscherkarriere untersuchte der Archäologe zahlreiche vorgeschichtliche Artefakte. Seines Erachtens ist der Knochen

einer Hyäne, der in den 1970er Jahren an der Fundstelle Les Pradelles in der Nähe von Angoulême auftauchte, auffällig ungewöhnlich.

Meist deuten Archäologen solche gekerbten Objekte als Kunst, d’Errico ist aber der Ansicht, dass der Knochen auch eine praktische Funktion gehabt haben könnte: Mit den Kerben wurden möglicherweise numerische Werte festgehalten. Sollte er richtigliegen, dann wären anatomisch moderne Menschen nicht die Einzigen gewesen, die Zahlzeichen entwickelten. Auch die Neandertaler könnten schon damit begonnen haben.

Als d’Errico und sein Team ihre Theorie 2018 veröffentlichten, wagten sie sich auf kaum erforschtes Terrain. »Der Ursprung der Zahlen ist immer noch eine unbesetzte Nische in der Wissenschaft«, sagt Russell Gray, Evolutionsbiologe am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig. Forscher sind sich bisweilen nicht einmal einig darüber, was Zahlen genau sind. In einer Studie aus dem



**KNOCHEN EINER HYÄNE** Eine Neandertalerin oder ein Neandertaler hat vor zirka 60000 Jahren Kerben in diesen Knochen geritzt. Einige Forscher sind davon überzeugt, dass die Frühmenschen auf diese Weise zählten.

Jahr 2017 definierte ein Experte sie als eigenständige Einheiten mit exakten Werten, die durch Symbole dargestellt sind.

Inzwischen sind Kognitionswissenschaftler, Anthropologen und Psychologen auf der Suche nach dem Ursprung der Zahlen. Dafür analysieren sie heutige Gesellschaften und deren Zahlensymbole, um so Unterschiede zwischen den jeweiligen Zahlensystemen zu identifizieren – und letztlich deren Wurzeln zu erhellen. Archäologen wiederum versuchen, Utensilien aufzuspüren, mit denen gerechnet oder auf denen Mengen, Summen und Ähnliches festgehalten wurden. Und zuletzt gibt es Evolutionsbiologen, die mit linguistischen Methoden der Entstehung von Zahlwörtern wie »eins«, »erstens« und »einmal« nachgehen.

Das Forschungsfeld wird vermutlich dank einer Förderung des Europäischen Forschungsrats noch wachsen. 2020 erhielt das Projekt »Evolution of Cognitive Tools for Quantification« (QUANTA) eine Unterstützung in Höhe von zehn Millionen Euro. Das Projektteam will aufklären, wie und wann Menschen die für das Zählen nötigen kognitiven Fähigkeiten entwickelt haben. Zudem soll bestimmt werden, mit welchen Werkzeugen sie Zahlensysteme schufen – mit sprachlichen oder schriftlichen Mitteln, mit Gegenständen oder körperlich, etwa mit den Fingern. QUANTA geht auch der Frage nach, ob nur anatomisch moderne Menschen ein Gespür für Zahlen haben oder ob dies bereits bei den Neandertalern aufgekeimt war.

Ganz zu Anfang gingen Forscher davon aus, dass *Homo sapiens* als einzige Spezies Gegenstände und Sachverhalte quantifizieren, also in messbaren und numerischen Werten ausdrücken kann. Doch seit Mitte des 20. Jahrhunderts belegen immer mehr Studien, dass auch viele Tiere über diese Fähigkeit verfügen. So können Fische, Bienen und Küken Mengen bis zur Größe von vier erkennen, und zwar ad hoc und ohne zählen zu müssen. Das ist unter der Bezeichnung Simultanerfassung bekannt. Einige Tiere können zudem zwischen zwei großen Mengen unterscheiden, wenn diese eindeutig genug ungleich sind. Das heißt, sie

sind in der Lage, 10 und 20 Objekte auseinanderzuhalten, aber nicht 20 und 21. Säuglinge im Alter von sechs Monaten haben ein ähnliches Verständnis von Quantitäten, bevor sie ein gewisses Maß an Kultur oder Sprache mitbekommen haben.

Laut Andreas Nieder, einem Neurobiologen an der Universität Tübingen, deutet all das darauf hin, dass der Mensch ein angeborenes Verständnis für Zahlen hat. Entstanden sei es als Teil der Evolution, genauer gesagt durch natürliche Selektion. Die Fähigkeit zum Rechnen habe sich als Anpassungsvorteil erwiesen, meint Nieder. Anders deutet der Kognitionswissenschaftler Rafael E. Núñez von der University of California in San Diego die Belege. Nach Ansicht des QUANTA-Chefforschers verfügen zwar zahlreiche Tiere über ein angeborenes Mengenverständnis, doch die menschliche Auffassung von Zahlen sei so viel höher entwickelt, dass sie unmöglich nur durch natürliche Auslese entstanden sein könne. Dass es Wörter und Zeichen für Zahlen gibt, müsse auch einer kulturellen Evolution entstammen. Dabei eignen sich Individuen durch Nachahmung oder Unterricht eine neue Fähigkeit an, beispielsweise jene, wie man ein Werkzeug benutzt.

### Mengenverständnis versus Zahlenverständnis

Obleich auch viele Tiere Kulturen entwickeln, etwa den Gebrauch bestimmter Hilfsmittel, um effizienter auf Beutefang zu gehen, hat keine Spezies je Zahlen hervorgebracht. Diese sind etwas spezifisch Menschliches. So können zwar Schimpansen in Gefangenschaft lernen, abstrakte Symbole zur Darstellung von Mengen zu verwenden. Doch weder sie noch andere Tiere nutzen derartige Zeichensysteme in ihrer natürlichen Umgebung. Núñez schlägt daher vor, zwischen der angeborenen »quantitativen« Kognition bei Tieren und der erlernten »numerischen« Kognition bei Menschen zu unterscheiden.

Nieder widerspricht. Neurobiologischen Studien zufolge ähneln sich die Hirnaktivitäten bei Tieren, die Mengen bemessen, und bei Menschen, die Zahlen verarbeiten. Es sei daher irreführend, die beiden Verhaltensweisen streng trennen zu wollen. Trotzdem ist auch der Neurowissenschaftler der Ansicht, dass die Fähigkeiten des Menschen die aller Tiere übertreffen. »Kein Tier ist in der Lage, Zahlensymbole wirklich darzustellen«, erklärt Nieder.

Wie die frühesten Zahlensysteme das Licht der Welt erblickten, könnte d’Erricos Analyse des Knochens von Les Pradelles erhellen. Der Archäologe, der zur Projektleitung von QUANTA gehört, untersuchte die neun Kerben auf dem Hyänenknochen im Mikroskop. Seines Erachtens sind sie in Form und Schnitttiefe einander derart ähnlich, dass sie vermutlich alle mit demselben Steinwerkzeug und derselben Handhaltung produziert wurden. Demnach könnten sie von derselben Person stammen, die innerhalb weniger Minuten oder Stunden die Ritzen vornahm. Acht weitere, flachere Kerben auf dem Knochen entstanden dagegen wahrscheinlich zu einem anderen Zeitpunkt.

Dass es sich um ein dekoratives Muster handelt, schließt d’Errico aus. Dafür seien die Kerben zu ungleichmäßig angeordnet. Zum Vergleich zieht er einen 40000 Jahre alten

## AUF EINEN BLICK EINS, ZWEI, DREI

- 1 Einige altsteinzeitliche Knochenstücke werten Archäologen als Hilfsmittel zum Zählen. Sollte sich die These erhärten, hätten bereits die Neandertaler die Fähigkeit des Zählens beherrscht.
- 2 Um den Ursprung der Zahlen zu erkunden, gehen Forscher unterschiedlich an das Thema heran. Linguisten suchen nach den Sprachwurzeln von Zahlwörtern, Archäologen spüren Rechenhilfsmitteln nach.
- 3 Laut einer These ging die Entwicklung von Zahlen mit der Menge an Besitz einher. Mehr Eigentum erforderte demnach höhere Zahlenbereiche.





**MUSCHEL MIT RITZDEKOR** Ein *Homo erectus* sammelte einst auf Java diese Muschel und verspeiste wohl ihren Inhalt. Danach verzierte er die Schale mit einem Ritzmuster.

JORDENS, J. ET AL.: HOMO ERECTUS AT TRINIL ON JAVA USED SHELLS FOR TOOL PRODUCTION AND ENGRAVING. NATURE 578, 2016, 710. ZA: NUTZUNG GEMEINDE VON SPRINGER NATURE / CC BY

Knochen eines Raben von einem Lagerplatz der Neandertaler auf der Krim heran. Darauf befinden sich ebenfalls Kerben, sieben Stück. Wie eine statistische Analyse von d'Errico und seinem Team 2017 ergab, entstehen Kerben mit derselben Regelmäßigkeit auch dann, wenn Teilnehmer eines Experiments einen Knochen mit gleichmäßigen Kerben verzieren sollen. Diesem Muster würden die Markierungen auf dem Knochen von Les Pradelles aber nicht entsprechen, sie seien unregelmäßiger verteilt. Zusammen mit der Annahme, die Ritzungen seien in einem kleinen Zeitfenster entstanden, brachte das den Archäologen zu dem Schluss, dass sie vielleicht rein funktional und nicht ornamental waren. In dem Fall könnten die kurzen Striche numerische Informationen dokumentieren.

Der Knochen von Les Pradelles ist kein Einzelfund. So entdeckten Archäologen bei Grabungen in der südafrikanischen Border Cave einen etwa 42000 Jahre alten Pavianknochen, der ebenfalls Einkerbungen aufweist. Laut d'Errico haben wahrscheinlich anatomisch moderne Menschen darauf Zahlen vermerkt. Seine Mikroskopanalyse der 29 Kerben ergab, dass sie mit vier verschiedenen Werkzeugen

und somit wohl zu vier verschiedenen Gelegenheiten eingeritzt wurden. Entdeckungen der vergangenen 20 Jahre stützen aus seiner Sicht die Vermutung, dass Frühmenschen bereits einige hunderttausend Jahre eher begannen, abstrakte Ritzungen anzufertigen, als bisher angenommen. Folglich hat sich auch eine höhere Stufe der Kognition womöglich sehr viel früher eingestellt.

Was aber war der Auslöser dafür, dass Frühmenschen Zahlensysteme schufen? D'Errico zufolge das Schnitzen und Kratzen an den Knochen selbst, also das Anfertigen der Artefakte. Seine Hypothese ist eine von bisher nur zwei bekannten Theorien zum Ursprung der Zahlen.

Der Archäologe stellt sich folgendes Szenario vor: Am Anfang war der Zufall. Als Frühmenschen wie *Homo erectus* beim Schlachten immer wieder unbeabsichtigt Schnittspuren auf den Tierknochen hinterließen, erkannten sie irgendwann, dass sie die Gebeine auch mit Mustern versehen könnten. Ein Beleg sei eine 430000 Jahre alte Muschel, die in Trinil auf der indonesischen Insel Java gefunden wurde. Auf diesen kognitiven Entwicklungssprung folgte ein weiterer: Die Frühmenschen fingen

irgendwann damit an, bestimmten Markierungen eine Bedeutung zuzusprechen – und vielleicht auch eine numerische. Der Hyänenknochen von Les Pradelles ist möglicherweise das früheste bekannte Beispiel dafür, meint d'Errico. Seiner Ansicht nach führten die Kerben schließlich zur Erfindung von Zahlzeichen wie 1, 2 und 3.

D'Errico ist sich bewusst, dass sein Szenario Lücken aufweist. Unklar ist nämlich, welches kulturelle oder soziale Umfeld die Frühmenschen überhaupt dazu veranlasste, Kerben in Knochen und andere Artefakte zu schneiden und damit irgendwann Zahlen zu verknüpfen.

QUANTA-Kollege Núñez sowie einige Experten, die nicht an dem Projekt beteiligt sind, raten deshalb zur Vorsicht. Artefakte wie der Knochen von Les Pradelles seien schwierig zu interpretieren. Karenleigh Overmann von der University of Colorado verweist dazu auf die von australischen Aborigines verwendeten »message sticks« oder Botenstäbe. Diese bestehen meist aus einem flachen oder zylindrischen Stück Holz und sind mit Ritzlinien verziert. Die Kerben sehen so aus, als ob sie numerische Werte wiedergeben würden – bei vielen ist das aber nicht der Fall, erklärt die Kognitionsarchäologin.

Piers Kelly stimmt dem zu. Der an der australischen University of New England lehrende linguistische Anthropologe hat die »Botschaftshölzer« untersucht und festgestellt, dass einige Stäbe Kerbhölzern ähneln, tatsächlich aber keine Zählhilfe sind, sondern als visuelle Gedächtnisstütze dienen. Sie sollten dem Überbringer einer Nachricht helfen, sich an inhaltliche Details zu erinnern. Die Stöcke eignen sich zudem zur Übermittlung ganz unterschiedlicher Informationen, weiß der Aborigine-Bote Wunyungar, der zu den Gemeinschaften der Gooreng Gooreng und Wakka Wakka gehört. »Einige Hölzer werden für den Handel verwendet, für Lebensmittel, Werkzeuge oder Waffen«, sagt Wunyungar. »Andere können Friedensnachrichten nach einem Krieg überbringen.«

### Manche Gemeinschaften zählen bis drei

Karenleigh Overmann hat ihre eigene Hypothese entwickelt, um die Entstehung von Zahlensystemen zu erklären. Sie konzentriert sich aufs Hier und Heute. Und für ihre Forschung sind die Ergebnisse anderer Experten interessant: So berichteten 2012 die Linguisten Claire Bower und Jason Zentz von der Yale University, dass unter 139 Sprachen der australischen Ureinwohner manche Zahlwörter eine Obergrenze bei drei oder vier haben. In einigen dieser Sprachen gibt es für höhere Werte nur Sammelzahlwörter wie »mehrere« und »viele«. Die Pirahã im brasilianischen Amazonasgebiet sollen angeblich gar keine Zahlen gebrauchen.

Overmann und andere Forscher betonen, dass Gesellschaften, die relativ einfache Zahlensysteme verwenden, deshalb nicht weniger intelligent sind. Die Unterschiede könnten aber Hinweise auf die soziale Notwendigkeit liefern, die zu komplexeren Zahlensystemen führen. Im Jahr 2013 analysierte Overmann Daten aus 33 modernen Jäger-und-Sammler-Gesellschaften weltweit. Sie fand heraus, dass Menschen, die mit einfachen Zahlensystemen bis maximal vier auskommen, oft wenig materiellen



**EIN RECHENBRETT? Der gekerbte 42000 Jahre alte Pavianknochen (drei Ansichten) fand sich in der südafrikanischen Border Cave. Womöglich diente er als Zählhilfe.**

Besitz haben. Anders verhält es sich bei Gemeinschaften, die weit über vier hinaus zählen – sie sammeln deutlich mehr Eigentum an. Daraus folgerte Overmann: Wenn eine Gesellschaft großen materiellen Reichtum angehäuft hat, entsteht ein Anlass, komplexere Zahlensysteme zu entwickeln. Solche Gruppen schufen interessanterweise entweder ein Quinär-, Dezimal- oder 20er-System. 5, 10, 20 – womöglich, so glaubt Overmann, sind diese Systeme aus dem Abzählen mit den Fingern hervorgegangen.

Wie Finger und Zahlen zusammenhängen, lässt sich laut der Forscherin mit der Theorie des »material engagement« (MET) erklären. Der Kognitionsarchäologe Lambros Malafouris von der University of Oxford hat vor gut zehn Jahren in seinem Buch »How Things Shape the Mind« dargelegt, dass sich der Verstand über das Gehirn hinaus in Objekte fortsetzen kann, etwa in Form von Werkzeugen oder auch durch die Finger. Auf diese Weise lassen sich Vorstellungen physisch und real umsetzen. Zahlen scheinen dabei mit den Fingern anschaulicher zu werden und seien leichter zu addieren oder zu subtrahieren.

Gesellschaften gingen deshalb über das Fingerzählen hinaus, weil ihr Bedürfnis nach höheren Zahlen gewachsen sei: je mehr materielles Eigentum, desto größer der Wunsch, es zu zählen und den Überblick darüber zu behalten. Gemäß der MET ist auch ein Kerbholz eine Erweiterung des Verstands. Es fungiert zudem als Merkhilfe oder Notiz, um weiter und höher zählen zu können. Solche Hilfsmittel könnten Menschen also genutzt haben, um ihren Zahlenbereich zu erweitern. Als Erste sind wohl mesopotamische Stadtkulturen diesen Schritt gegangen, die Ressourcen und Menschen besser verwalten wollten. Bei Grabungen in Städten des Altertums wie Uruk oder Susa kamen bis zu 5500 Jahre alte Zählsteine ans Licht.



MIT FOT. GEN. VON FRANCESCO D'ERRICO UND LUCHINA BACCHIELLI, D'ERRICO, F. ET AL.: FROM NUMBER SENSE TO NUMBER SYMBOLS. AN ARCHAEOLOGICAL PERSPECTIVE. PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY B 373, 2018. FIG. 4A; BARRAS, C.: HOW DID ANCIENT HUMANS LEARN TO COUNT? NATURE 594, 2021. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Solche Tonmarken wurden unterschiedlich geformt und gebrannt – es sind Kugeln, Zylinder, Kegel oder Scheiben. Die Formen entsprechen bestimmten Werten: Zehn kleine Kegel kommen einer Kugel gleich und sechs Kugeln einem großen Kegel. Mit großen Kegeln, die jeweils 60 kleinen Kegeln entsprechen, konnten die Menschen mit relativ wenigen Tonmarken bis in die Tausende zählen.

### War Fingerzählen der erste Schritt zu hohen Zahlen?

Overmanns These stößt auf geteiltes Echo. Die Psychologin und Koleiterin des QUANTA-Projekts Andrea Bender von der norwegischen Universität Bergen plant mit ihrem Team, möglichst viele Daten über die Zahlensysteme der Welt zu sammeln und sie auszuwerten. Damit sollte sich ihres Erachtens auch Overmanns Theorie bestätigen oder widerlegen lassen. Bender will sich daher noch nicht festlegen, ob die Forschungskollegin nun Recht hat oder nicht. Andere Wissenschaftler wie der Philosoph Karim Zahidi von der Universität Antwerpen sind hingegen Feuer und Flamme. Zahidi meint, Overmanns These sei zwar noch lückenhaft, habe jedoch durchaus das Potenzial, die Entstehung der Zahlensysteme zu erklären.

Dass ihr Erklärungsmodell nicht vollständig ist, weiß die Kognitionsarchäologin. So kann sie noch nicht festlegen, wie weit der Ursprung der Zahlensysteme zurückreicht. Linguistische Analysen sollen aber Abhilfe schaffen. Und erste Erkenntnisse legen nahe, dass die Geschichte der Zahlwörter womöglich Zehntausende von Jahren alt ist.

Der Evolutionsbiologe Mark Pagel von der University of Reading und seine Kollegen verbringen bereits viele Jahre damit, die Herkunft von Wörtern in den heute existierenden Sprachfamilien zu erforschen. Dazu nutzen sie ein Computerprogramm, das sie ursprünglich zur Analyse biologischer Evolutionsprozesse entwickelt haben. Ihr Ansatz ist folgender: Wörter werden als Einheiten aufgefasst, die entweder stabil bleiben oder – wenn sich andere Sprachen ausbreiten – verdrängt und ersetzt werden. Ein Beispiel für Stabilität wären das englische »water« und das

deutsche »Wasser«, sie sind eindeutig miteinander verwandt. Doch das deutsche »Hand« unterscheidet sich vom spanischen »mano« – diese Wörter gehen offenbar auf unterschiedliche Wurzeln zurück oder eines wurde irgendwann durch das andere ersetzt. Pagel und sein Team berechneten nun, wie häufig solche Veränderungen über lange Zeiträume hinweg aufgetreten sind, und leiteten daraus eine Wechselrate ab. Damit schätzten sie dann das Alter der Wörter.

Mit diesem Ansatz zeigen Mark Pagel und Andrew Meade, dass niedrige Zahlwörter von eins bis fünf zu den stabilsten Einheiten der gesprochenen Sprache gehören. Sie haben sich so wenig verändert – auch über Sprachfamilien wie dem Indogermanischen hinweg –, dass sie vermutlich seit 10 000 bis 100 000 Jahren stabil blieben.

Das beweist zwar nicht, dass die Zahlen von eins bis fünf von uralten Wörtern abstammen, die vor Zehntausenden von Jahren zum ersten Mal gesprochen wurden. Aber laut Pagel ist es zumindest denkbar, dass ein moderner und ein altsteinzeitlicher Eurasier einander verstehen würden, wenn es um solche Zahlwörter geht. Pagels Arbeit hat Befürworter gefunden, doch es gibt auch Widerspruch, etwa von Philologen wie Don Ringe von der University of Pennsylvania. Seines Erachtens lässt sich die Stabilität von Zahlwörtern nicht derart weit in die Vorgeschichte projizieren. Nur weil sie in den letzten Jahrtausenden stabil waren, heiße das nicht, dass es sich auch vor noch längerer Zeit so verhalten habe.

Der Ursprung der Zahlen ist längst nicht in allen Belangen erforscht. Darin sind sich die Wissenschaftler einig. Und die Möglichkeit besteht, dass Menschenformen schon früh zu zählen begannen, weil es nötig und wichtig wurde. Der Knochen aus der Border Cave ist jedenfalls so stark abgerieben, als ob jemand ihn über viele Jahre hinweg angefasst hat. »Es war eindeutig ein bedeutender Gegenstand für das Individuum, das ihn hergestellt hat«, sagt d'Errico. Nicht so das Exemplar aus Les Pradelles, dessen Oberfläche rauer ist. Und möglicherweise, so meint d'Errico, hat der Neandertaler, der den Tierknochen vor etwa 60 000 Jahren bearbeitete, ihn nur kurz gebraucht und dann weggeworfen. Aber benutzt hat er ihn eben vielleicht zum Zählen. ◀

### QUELLEN

**D'Errico, F. et al.:** From number sense to number symbols. An archaeological perspective, *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 373 (1740), 2018

**Nieder, A.:** Number faculty is rooted in our biological heritage, *Trends in Cognitive Sciences* 21 (6), 2017

**Núñez, R. E.:** Is there really an evolved capacity for number? *Trends in Cognitive Sciences* 21 (6), 2017

**Overmann, K. A.:** Material scaffolds in numbers and time, *Cambridge Archaeological Journal* 23 (1), 2013

### nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
 Nature 594, 2021, S. 22–25

# REZENSIONEN

Jesper Nyström  
**PLANET DER PILZE**  
Wie ein uraltes Netzwerk unsere Welt zusammenhält  
Kosmos, Stuttgart  
2021  
208 S., €24,-



**FARBENSPIEL**  
Nicht alle Pilzfruchtkörper sind so unscheinbar wie unsere gängigen Speisepilze. Im Bild die Schmetterlings-Tramete (*Trametes versicolor*).

LWMBERICU / GETTY IMAGES / STOCK

## BOTANIK VOM ALBA-TRÜFFEL ZUM RAUSCHMITTEL

**Der Biologe Jesper Nyström vermittelt spannende Fakten über Pilze – manchmal allerdings mit einer etwas unpassenden Ausdrucksweise.**

► In Schweden ist der Verzehr von Pilzen noch nicht sehr alt. Sie galten lange nur als Viehfutter. Schleimige Konsistenz und Wachstum im Schatten rückten sie in die Nähe von Angst einflößenden Fantasiewesen wie Gespenstern und Trollen. Sie seien »ein streunendes Pack, das sich alles einverleibt, was zurückgelassen wurde, nachdem Flora sich im Herbst in ihr Winterquartier zurückgezogen hatte«, so beschrieb sie 1772 der Naturforscher Carl von Linné in einer Rede über den »Liebreiz der Natur«.

Dieses Bild hat sich inzwischen geändert. Der schwedische Biologe Jesper Nyström interessierte sich zunächst für Greifvögel, bevor er sich mit den ungewöhnlichen Gewächsen beschäftigte. Mit seinem Buch über Pilze reiht er sich nun unter die Wissenschaftsautoren der Botanik ein. Dabei betont er natürlich, dass Pilze keine richtigen Pflanzen sind.

Der Autor leitet sein Werk mit der Frage seiner kleinen Tochter bei der Pilzsuche im Wald ein: »Warum kann man keine Pfifferlinge züchten?« Auf Anhieb hat er keine Antwort parat. In sechs weiteren Kapiteln und einem Epilog trägt er alles zusammen, was man braucht, um das Problem zu lösen. Dabei stößt er über Um- und Nebenwege auch auf neue Forschungsergebnisse.

Überschneidungen mit anderen populärwissenschaftlichen Pilzbüchern lassen sich natürlich nicht vermeiden. Aber »Planet der Pilze« enthält genügend neue Informationen, die das Werk absolut lesenswert machen. Zudem ist es schön aufgemacht: Die ganz- und teilweise sogar doppelseitigen Bilder sind exzellent. Wie Nyström herausarbeitet, sind Pilze wahrscheinlich viel älter als bisher angenommen: 2017 fand man fossilisierte Hyphen

eines Pilzmycels in 2,4 Milliarden altem Gestein aus Südafrika. Etwa 100 000 Arten sind bis heute beschrieben, 1200 weitere werden jährlich neu entdeckt; Experten schätzen, es könnte insgesamt bis zu 1,5 Millionen geben. Da bleibt für sie also noch sehr viel zu erforschen.

Eindrucksvoll ist auch, dass allein ein Kilogramm Erde 600 Kilometer Hyphen enthalten kann, die ein weißes Geflecht bilden. Bei etwa 95 Prozent der bekannten Blütenpflanzen legen sich solche Stränge um deren feine Wurzeln, umschließen sie dicht wie eine Haut oder dringen sogar in sie ein. Der Pilz bekommt damit – weil er es selbst mangels Chlorophyll nicht kann – von der grünen Pflanze Zucker und spendet ihr Nährsalze und Wasser. Um 1995 gelang es der Forstwirtschaftlerin Suzanne Simard in Kanada, mit radioaktiv markiertem CO<sub>2</sub> nachzuweisen, dass Tannen und Birken über diese unterirdischen »Kabel« auch Informationen übermitteln. Seitdem hat sich der Begriff »Wood Wide Web« dafür eingebürgert. Der Autor geht Überlegungen nach, ob die Pilze eine Symbiose mit den Pflanzen eingehen oder das Gegenteil davon: Wer parasitiert wen?

Auch zu Hefepilzen gibt es neben der Gärung manches, was man so noch nicht gelesen hat. Nyström geht insbesondere der Entdeckung des Penizillins (»der beste Freund des Menschen«) nach. Dabei schildert er sehr genau, was passiert, bis die Bakterien absterben. Das dazugehörige Kapitel führt zudem in die aktuellen Probleme mit den Antibiotika ein – von Krankenhäusern bis zu industriellen Viehställen.

Im Buch erfährt man, was sich neben dem Verzehr von Speisepilzen (mit Preisen von teilweise über 300 000 Euro für 1,5 Kilogramm Alba-Trüffel) noch alles mit den Gewächsen machen lässt: Leder, Legosteine, Rauschmittel, Schwangerschaftstests, Biokraftstoffe und vieles mehr. Auf der anderen Seite listet der Autor auch die Schäden durch Pilze in der Landwirtschaft oder in Häusern auf.

So informativ und interessant die angesprochenen Themen sind, wird

nicht jedem der Sprachstil gefallen. Zum Beispiel wenn der Autor davon spricht, dass für »das Bakterium Game over« wäre, oder »eklig kackbraune Pilzbeläge in der Reaktoranlage von Tschernobyl« beschreibt sowie von Pilzen schreibt, »die Party machten« oder eine Abbildung mit der Bildunterschrift »ein echter Scheißpilz« versieht.

Jürgen Alberti ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.



## KOSMOLOGIE ALLES ÜBER GALAXIEN

**Ruth Grützbauch nimmt uns auf ihrem Lastenrad mit durch die Galaxis und erzählt im Vorbeifliegen Geschichten über ihre Zeit als Studentin, Astronomin und Wissenschaftsvermittlerin.**

► Inspiriert von der Euphorie ihrer Freunde, als sie zum ersten Mal das aufblasbare Planetarium des britischen Jodrell Bank Discovery Centres betreten, kommt der Astronomin Ruth Grützbauch eine Idee: ein mobiles Planetarium, das sie auf einem Lastenrad direkt zu ihrem Publikum bringen kann. Seit 2018 radelt sie mit ihrem Cosmobike durch Österreich, um Kinder wie Erwachsene mit einem Blick in die Sterne zu begeistern.

Der Titel ihres Buchs »Per Lastenrad durch die Galaxis« vereint ihre Leidenschaft für ihr Cosmobike mit jener für Douglas Adams' Science-Fiction-Klassiker »Per Anhalter durch die Galaxis« und trifft genau den Ton des Romans:

persönlich, unterhaltsam und lehrreich im Plauderton. Grützbauch beginnt jedes Kapitel mit einer Anekdote, etwa über Beobachtungszeiten an Observatorien, ihr Studium oder ihren Arbeitsalltag. Einzige Ausnahme ist der Abschnitt zum Hubble-Weltraumteleskop, für das sie sich kreativ in die Rolle einer Spezialistin während einer Reparaturmission im Space-shuttle hinein fühlt.

Nach diesen lockeren Einstiegen widmet sie sich verschiedenen Themen der Astronomie, die sich am besten zusammenfassen lassen unter dem vagen Motto »Alles über Galaxien«: von ihrer Entstehung, Entwicklung und ihrem Ende, über ihre Verschmelzung und Beobachtung, bis hin zu »kosmologischen Evergreens« wie Dunkler Materie, Dunkler Energie, der Hintergrundstrahlung und dem kosmologischen Prinzip. Die Autorin bewegt sich dabei chronologisch durch das Leben einer Galaxie und beantwortet die Frage: »Ist die Milchstraße eine normale Galaxie?«.

Bei so viel Material arten ihre Erklärungen manchmal zu seitenlangen Beschreibungen diverser Prozesse aus, die zwar mit amüsanten Vergleichen und anschaulichen Beispielen gespickt, doch streckenweise etwas zäh sind. Gerade Leserinnen und Leser ohne Vorkenntnisse könnten hier leicht ins Stolpern geraten oder den Faden verlieren, obwohl sie die eigentliche Zielgruppe des Buches zu sein scheinen.

Die Abbildungen stellen hingegen ein besonderes Highlight dar. Sie sind in einheitlichem Stil und künstlerisch designt, doch leider rar gesät. Insbesondere die dichteren Passagen hätten durch zusätzliche Illustrationen aufgelockert werden können.

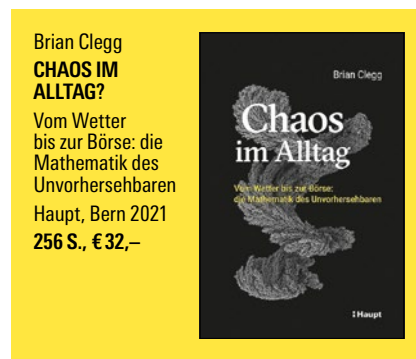
Das titelgebende Lastenrad bleibt dabei lediglich als Teil der Rahmehandlung im Hintergrund. Wer nach einem Blick in die (realen oder projizierten) Sterne noch nicht genug von Galaxien hat, ist mit diesem Buch gut bedient.

Sabrina Patsch ist Doktorandin am Institut für theoretische Physik der FU Berlin.

## CHAOSTHEORIE VIEL ALLTÄGLICHES, WENIG MATHEMATIK

**Der populärwissenschaftliche Autor Brian Clegg beleuchtet die einst hochgepuschte Chaostheorie. Doch der wissenschaftliche Teil gerät etwas kurz.**

► In den 1980er und 1990er Jahren erlebte das Chaos einen regelrechten Hype. Das Thema schaffte es in eine Vielzahl populärwissenschaftlicher Bücher und Zeitschriften, in die wissenschaftliche Fachliteratur, zu Fotoausstellungen in vielen Städten und gipfelte vielleicht im Titelblatt einer Ausgabe des »Spiegel« 1993: »Kult um das Chaos – Aberglaube oder Welterklärung?« Der Autor Brian Clegg möchte in seinem Buch den Spagat zwischen der zu Grunde liegenden Mathematik und den alltäglichen Erscheinungen schaffen.



Die fachliche Grundlage der Chaostheorie erläutert er dabei in verschiedenen Abschnitten. Eines ihrer wesentlichen Merkmale, die so genannte sensitive Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen, beschreibt Clegg zuerst am Doppelpendel und dann an den Beobachtungen des US-amerikanischen Meteorologen Edward Lorenz aus den 1960er Jahren. Dieser fand mit Computerunterstützung heraus, dass seine Wetterprognosen bei winzigen Veränderungen in den Anfangsdaten zu sehr verschiedenen Ergebnissen führten. Diese Erkenntnis wurde als Schmetterlingseffekt weltberühmt.

Eine weitere Eigenschaft des Chaos ist die Selbstähnlichkeit. Reale Beispiele

le dafür findet man zumindest näherungsweise in der Natur, etwa bei einem Farnblatt, Blumenkohl oder den Verästelungen im Blutsystem: Vergrößert man einen kleinen Ausschnitt, sieht dieser dem Original wieder ähnlich. Exakt selbstähnlich sind mathematische Fraktale wie die Schneeflockenkurve, das Feigenbaum-Diagramm und die Mandelbrot-Menge, die im Buch abgebildet sind. Für Laien ist durch Cleggs Erklärungen aber nicht leicht zu verstehen, wie sie entstehen. Denn er verzichtet darauf, eine Formel zur Funktionsvorschrift anzugeben – was in diesem Fall wahrscheinlich hilfreich gewesen wäre.

Der Autor macht deutlich, dass mathematisches Chaos nichts mit zufälligen Erscheinungen zu tun hat. Ereignisse wie Münz- oder Würfelwürfe berechnet man statistisch: Den nächsten Wurf kann man zwar nicht vorhersagen, wohl aber das Langzeitverhalten – insofern ist der Zufall für den Autor berechenbar. Chaos ist hingegen nicht zufällig, sondern deterministisch: Jeder Rechenschritt ist eindeutig festgelegt, trotzdem ist das Verhalten praktisch unvorhersehbar.

Durch diese Erkenntnis und die wunderbar farbigen Bilder der Mandelbrot-Menge war der Bereich für populäre Veröffentlichungen prädestiniert. Darüber hinaus führte die markante Bezeichnung »Chaos« zu missverständlichen Vorstellungen. Der Autor schreibt, es »wäre wirklich besser gewesen, wenn (man) sich ein anderes Wort ausgedacht hätte, weil es sehr schwierig ist, den Begriff von seiner ursprünglichen Bedeutung zu trennen«.

Im Buch nehmen Erscheinungen des Chaos im Alltag einen breiten Raum ein. Das reicht vom Billardspiel und dem Flipperautomaten über moderne Wettervorhersagen, Probleme bei der Stichprobenauswahl für Meinungsumfragen, Herzflimmern, Verschlüsselungsverfahren und Börsenkursen bis hin zum »Stau aus dem Nichts« auf Autobahnen. Viele dieser Themen führt Clegg kurz aus.

An manchen solchen Phänomenen versucht er charakteristische Merkmale

le des Chaos zu zeigen, etwa bei Börsencrashes. Wie das vorige Zitat vermuten lässt, weiß der Autor, dass das umgangssprachlich verwendete Wort nicht immer mit dem mathematisch definierten Effekt übereinstimmt. Diese Tatsache beachtet er allerdings manchmal selbst nicht. So beschreibt Clegg knapp, der Biologe Robert May habe mit einer »relativ einfachen Gleichung« Bevölkerungszahlen berechnet – und diese könnten je nach Wachstumsrate chaotisch hin- und herspringen. Dabei führt er aber nicht aus, dass sich das aus theoretischen Modellierungen für Populationen ergibt, die nur in Ausnahmefällen auch für bestimmte Gruppen von Lebewesen zutreffen. Der von Clegg abschließend formulierte Satz »Chaos in der Bevölkerungsentwicklung gehört zum Alltag« ist sicherlich überzogen, vor allem, wenn man an menschliche Populationen denkt. Eventuell führt hier die Übersetzung vom englischen »population« mit dem deutschen »Bevölkerung« zu Missverständnissen.

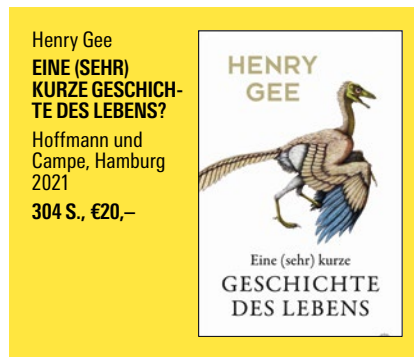
Dennoch beschreibt der Autor auf spannende Weise, in welchen Situationen sich chaotisches Verhalten feststellen lässt. Das mag viele überraschen, die noch nicht mit solchen Fragen konfrontiert waren. Allerdings zieht der Verfasser die Theorie dafür teilweise verkürzt heran. Wer dem Untertitel entsprechend die Mathematik dazu kennen lernen möchte, wird wenig finden.

Es ist sicher Absicht, so gut wie keine Formel zu verwenden, aber eine Beschreibung der Funktionsvorschrift, etwa für die Erzeugung der Mandelbrot-Menge, nur in kurzen Worten zu geben, erscheint unpassend. Man hätte sie in einer zusätzlichen Anmerkung außerhalb des laufenden Textes angeben können, von denen es ohnehin sehr viele gibt. Zudem enthält das Buch kein Literaturverzeichnis und verweist auf keinerlei Quellen. Leserinnen und Leser, die ein wenig von der Mathematik nachvollziehen wollen, müssen selbstständig recherchieren.

Hartmut Weber war Mathematiklehrer in Kassel und rezensiert regelmäßig für die Deutsche Mathematiker-Vereinigung.

## EVOLUTION DER GANZ GROSSE BOGEN

**Das Leben hat in seiner mehr als vier Milliarden Jahre währenden Geschichte bereits viele Höhen und Tiefen erlebt. Henry Gee gelingt es, diese wechselvolle Geschichte anschaulich, unterhaltsam und brandaktuell zu erzählen.**



► »Es war einmal ein riesiger Stern, der im Sterben lag ...« Henry Gee beginnt seine Geschichte des Lebens wie ein Märchen. Dieses transportiert jedoch keine Moral, sondern die hoffnungsvolle Erkenntnis, dass das Leben immer wieder einen Weg in die Zukunft gefunden hat – egal, welche Katastrophen ihm auch zugesetzt hatten – von Asteroideneinschlägen, Vulkanausbrüchen oder extremen Klimaschwankungen.

Der Paläontologe und Evolutionsbiologe Henry Gee ist langjähriger Redakteur des Wissenschaftsmagazins »Nature«. In dem Buch garniert er seinen klaren Stil mit einer ordentlichen Prise britischem Humor.

Von den Cyanobakterien im Ur-ozean zur Eroberung des Lands durch Pilze und Pflanzen, von Dinosauriern bis zur Entwicklung des *Homo sapiens*: Immer wieder gibt es beim Lesen Aha-Erlebnisse. Zusammenhänge erschließen sich, und Gee findet anschauliche und unterhaltsame Vergleiche, etwa wenn er einen Vorläufer der Wirbeltiere respektlos als »Kartoffel mit Bullaugen« beschreibt oder bei der Bakteriengenetik von einem »genetischen Wühltisch« spricht.

Damit man auf der Reise durch die Jahrmillionen nicht verloren geht, geben sechs Zeitleisten zu Beginn jedes Kapitels Hilfestellung. Trotzdem wünscht man sich beim Lesen Illustrationen – besonders weil Gee so lebendige Beschreibungen für die vielen wundersamen Wesen findet, die den Planeten einst bevölkerten.

Der Autor arbeitet sehr gut heraus, dass gerade Katastrophen wie extreme Kaltzeiten dem Leben immer wieder zu Entwicklungssprüngen verholfen haben. Und er rückt die Bedeutung des Menschen für unseren Planeten zurecht, wenn es heißt: »Von der gesamten menschlichen Geschichte, so kurz und ereignisreich sie auch gewesen sein mag, (...) wird nichts bleiben außer einer millimeterdünnen Schicht in irgendeinem zukünftigen Sedimentgestein.«

Obwohl Gee hervorragend schreibt und die Übersetzung von Alexander Weber gelungen ist, ist die Fülle an Details auf den 240 Seiten so groß, dass man das Buch nicht wie einen guten Roman verschlingen kann. Es braucht schon etwas Konzentration und Zeit zum Verdauen. Zudem empfiehlt es sich unbedingt, in die teils langen Fußnoten (50 Seiten am Ende des Buchs) zu schauen, wo Gee nicht nur Quellen und weiterführende Literatur nennt, sondern unter anderem auch darauf hinweist, wo man weitere Deutungen der fossilen Belege findet.

Das Buch bietet einen verständlichen und aktuellen Überblick über die faszinierende Entwicklung des Lebens auf der Erde. Hier und da hätten vielleicht ein paar weniger Beispiele genügt. Besonders interessant wird es am Ende, wenn es um die Rolle des Menschen geht. Denn der Blick auf das Erdgeschehen der vergangenen vier Milliarden Jahre kann auch für das eigene Selbstverständnis und aktuelle Probleme wie Klimawandel und Artensterben sehr anregend und relativierend sein, wie Gee im Nachwort ausführt. Sein Fazit: Verzagt nicht, denn noch dreht sich die Erde, und das Leben dauert an.

Gunther Willinger ist Biologe und Wissenschaftsjournalist in Tübingen.

## An vorderster Linie

**Wie wir das Universum retten.**

Eine Kurzgeschichte von Sylvia Spruck Wrigley

Zunächst einmal möchte ich, dass du jedes einzelne Wort vergisst, mit dem man dir im Rekrutierungsbüro den Kopf verdreht hat. Nein, halt einfach die Klappe, ich will nichts davon hören. Es ist alles gelogen.

Bau dich einfach hier direkt neben mir auf und schau dich in aller Ruhe um. Das ist die Frontlinie. Nein, das ist kein Euphemismus. Für gewöhnlich ist der Krieg ja alles andere als eine saubere Angelegenheit mit schnurgeraden Kampflinien und mit Strategien, die jeder sofort kapiert. Aber hier haben wir nur eine einzige Linie. Sie ist dieser Graben vor deiner Nase. Tritt nicht zu nahe an den Rand.

Die Sporianer zersetzen jeden Tag ungefähr vier von unseren Leuten. Dein Raumschiff ist mit zehn Kisten Nachschub und mit 500 Rekruten ohne Kampferfahrung angekommen. Du kannst dir also ausrechnen, wie lange ... Am besten freunde dich gar nicht erst mit jemandem an.

Sperr die Ohren auf und hör mir zu. Ihr braucht keine Uniform zu tragen, ihr müsst nicht lernen, eine Waffe abzufeuern. Ihr sollt nichts tun, als einfach da zu sein, Lebertran zu trinken und zu sterben. So sieht's aus. Das sind die Fakten.

Ach was, ich mach nur einen Witz. In Wirklichkeit ist es kein Lebertran. Das Zeug ist schlimmer. Es riecht wie etwas, das ein kranker Hund hinterlassen hat, und es schmeckt wie ranzige Butter. Du wirst lernen, den Würgereflex zu ignorieren und es hinunterzuschlucken. Genau wie wir Übrigen.

Denn das ist eines der wenigen Dinge, die wir wissen. Wir haben keine Ahnung, wie wir sie bekämpfen sollen. Wir wissen nicht einmal, ob sie intelligent sind. Aber jedes Mal, wenn wir aufgeben und ihnen ein Stück Fels überlassen, kommen sie näher heran. Deine Aufgabe ist einfach, so

dazustehen, als wolltest du infiziert werden. Aber lass dich bloß nicht infizieren. Das ist alles.

Falls du angesteckt wirst, merkst du nichts davon. Du wankst davon wie ein Zombie und suchst den nächsten Hügel, und ein paar Stunden später wächst aus deinem Kopf ein Stängel und explodiert. Leuchtend orange Sporen verteilen sich überall und suchen ein neues Zuhause. Verstehst du, das ist der Grund, warum wir diesen Graben vor unserer Nase so gern haben. Sobald du merkst, dass sich einer deiner Kumpel aufführt wie ein Zombie – stoß ihn hinein! Aber zack, zack!

Um die Wahrheit zu sagen: Als wir die ersten Berichte von der Erde bekamen, verhängten wir einfach eine planetare Quarantäne. Dort war ja ohnehin kaum noch jemand übrig, verstehst du? Aber dann beobachteten wir auf einmal orange Schimmelflecken auf dem Mars! Daraufhin schickten wir das Militär los und bombardierten den Roten Planeten mit jedem Pilzvernichtungsmittel, das die Menschheit je entwickelt hat. Dabei entdeckten wir das stinkende Öl. Die Sporianer mögen es nicht, keine Ahnung, warum. Überhaupt wissen wir einen feuchten Dreck über sie, außer dass wir ihnen genau hier und genau jetzt an diesem Graben standhalten müssen. Doch wenn sie die Wahl haben zwischen einem, der vom Anti-Pilz-Öl getrunken hat, und einem pingeligen Idioten, dem das Öl zu eklig schmeckt, dann infizieren sie jedes Mal den feinen Pinkel.

Jedenfalls, wir überließen ihnen den Mars. Die Regierungsbehörde sagte einfach: Na gut, nehmt euch den Planeten auch noch. Sie schrieben den Mars ab.

Aber damit war das Problem nicht erledigt. Ein paar Wochen später: orange Flecken! Die Sporianer begannen sich hier im Asteroidengürtel breitzumachen! Dabei gibt es gar keine Transportverbindung. Keine Seele ist in den vergangenen Jahren vom Mars zu den Asteroiden gereist. Wie sind sie also in kaum einem Monat hierhergekommen? Keiner weiß das.

Pass auf, jetzt sage ich dir, was wir herausgefunden haben. Eine sporianische Expansion findet nur dann statt, wenn wir uns vor ihnen verdrücken. An totem Gestein haben sie kein Interesse – sie wollen uns. Und solange die Regierung fortfährt, frisches Blut zu schicken, bleiben sie hier. Der uns nächste bewohnte Asteroid liegt nur zwei Astronomische Einheiten entfernt, unvergleichlich viel näher als der Mars, aber die Siedlung dort hat noch keinen einzigen Schimmelpilzfleck zu sehen bekommen. Und das wird so bleiben, solange hier zu Lande weiterhin blöde Rekruten wie du für Nachschub sorgen.

Die Hälfte der Kisten  
ist voll Schnaps.  
Wir müssen nicht  
nüchtern bleiben, nur  
die Stellung halten



Das Öl ist das einzige uns bekannte Mittel, das sie wenigstens ein bisschen zurückzucken lässt. Das wird dir zwar nichts nützen, falls du als Letzter übrig bleibst, doch so weit sind wir ja noch lange nicht. Jetzt trink erst einmal das Öl. Sag dem Kerl, der neben dir die Stellung hält, er soll sich keine Sorgen machen. Sieh zu, dass du nicht angesteckt wirst. Schubs jeden Infizierten in den Abgrund hinunter, und zwar so schnell, wie du verdammt noch einmal überhaupt nur kannst.

Tut mir echt leid, dass ich derjenige bin, der dir die schlechten Nachrichten beibringen muss, aber so sieht unser Krieg nun einmal aus. Du schiebst Wache am Rand eines Grabens und versuchst, länger als eine Woche durchzuhalten, während hellere Köpfe als unsereins nach einer Methode suchen, den Feind zurückzuschlagen.

Also gut, jetzt mach dich an die Arbeit. Fang an, diese Kisten da auszupacken, und dafür erfährst du von mir nach den vielen schlechten Nachrichten ein bisschen etwas Gutes.

Erstens: Anscheinend sterben die Infizierten einen leichten Tod. Ich habe davon mehr als genug sehen müssen. Hallinan zum Beispiel sagte zwar nichts und gab auch sonst kein Zeichen, aber er bekam am Ende so einen echt friedlichen Gesichtsausdruck. Patels letztes Wort lautete: »Endlich!« Steinberg starrte nur den Himmel an und grinste. Darüber mache ich mir so meine Gedanken: Vielleicht sind die Sporianer einfach Gott persönlich. Vielleicht ist dies das Jüngste Gericht. Vielleicht werdet ihr alle demnächst erlöst.

Natürlich weiß ich nicht, ob das die Wahrheit ist, aber der Gedanke hilft mir, Ruhe und Schlaf zu finden.

Zweitens: Die Hälfte der Kisten, die du gerade auslädst, sind voll mit Schnaps. Wir brauchen nicht nüchtern zu bleiben, wir müssen nur die Stellung halten. Es gibt kein Entkommen von diesem Stück Stein, also können wir genauso gut eine Party feiern. Wenn du Glück hast, findest du vielleicht sogar Cocktailspieße.

Die dritte gute Nachricht: Siehst du die unzähligen Sterne da draußen? Im Universum gibt es vielleicht eine Zentillion Menschen, die alle ein glückliches Leben genießen. Und siehst du diesen schmutzigen Graben? Dahinter lauern die Sporianer, und weil wir hier die Stellung halten, müssen sie drüben bleiben. Du bist der Retter des Universums. Du bist ein verdammter Held.

Darauf wollen wir trinken. ◀

#### DIE AUTORIN

**Sylvia Spruck Wrigley** stammt aus Deutschland und wuchs in Los Angeles auf. Sie schreibt nicht nur Sciencefiction, sondern auch übers Fliegen. Ihre Sciencefiction-Story »Alive, Alive Oh« wurde 2013 für den Nebula Award nominiert. Derzeit lebt sie in Tallinn (Estland).

#### nature

© Springer Nature Limited

[www.nature.com](http://www.nature.com)

Nature 497, S. 282, 2013

## Spektrum der Wissenschaft

**Chefredaktion:** Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

**Redaktionsleitung:** Dr. Hartwig Hanser

**Redaktion:** Manon Bischoff, Dr. Andreas Jahn, Dr. Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang, Mike Zeitz (stellv. Redaktionsleiter);  
E-Mail: [redaktion@spektrum.de](mailto:redaktion@spektrum.de)

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

**Layout:** Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Natalie Schäfer

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

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

**Redaktionsassistent:** Andrea Roth

**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle

**Herstellung:** Natalie Schäfer

**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

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

**Übersetzungen:** An diesem Heft wirkte mit: Dr. Markus Fischer

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto: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](mailto:spektrum@zenit-presse.de), Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

**Bezugspreise:** Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,-; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,-, PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

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

**Anzeigen:** E-Mail: [anzeigen@spektrum.de](mailto:anzeigen@spektrum.de), Tel.: 06221 9126-600

**Druckunterlagen an:** Natalie Schäfer, E-Mail: [schaefer@spektrum.de](mailto:schaefer@spektrum.de)

**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 43 vom 1.1.2022.

**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: © 2022 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

#### SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562  
Editor in Chief: Laura Helmut  
Executive Vice President: Michael Florek  
President: Kimberly Lau



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



# VORSCHAU



IN-FUTURE / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## NEUE VERBINDUNGEN IN DER MATHEMATIK

Ein vor Jahrzehnten gestartetes Großprojekt soll zwei grundverschiedene mathematische Gebiete miteinander verknüpfen und fundamentale Fragen aus der Zahlentheorie beantworten. Mit einer verblüffenden Herangehensweise an die Art, wie sich geometrische Objekte definieren lassen, scheint einem französischen und einem deutschen Forscher nun ein Durchbruch gelungen zu sein.



VELIMIR / ISTOCK.ADOBE.COM (SYMBOLBILD MIT FOTOMODELL)

## WIDER DIE SELBSTZERSTÖRUNG

Im dritten Teil unserer Serie über Autoimmunkrankheiten geht es um verschiedene Ansätze, solche Leiden zu behandeln. Im Fokus stehen dabei zielgerichtete Therapien, etwa auf der Grundlage von Antikörpern, Protein-Hemmstoffen oder gentechnisch veränderten Immunzellen.



NASA / GODDARD SPACE FLIGHT CENTER

## DIE GEFAHR SOLARER SUPERSTÜRME

Teilchen, die von der Sonne ausgestoßen werden, können bei uns Satelliten und technische Infrastruktur beschädigen. In der jüngeren Erdgeschichte waren starke Eruptionen laut jüngsten Analysen häufiger als gedacht.



SARAH J LEE / GETTY IMAGES / ISTOCK

## ES LIEGT WAS IN DER LUFT

Bei höheren Temperaturen sammelt sich mehr Wasserdampf in der Luft. Der heizt seinerseits die Atmosphäre auf und sorgt dazu für gefährliche Wetterphänomene wie sintflutartige Regenfälle und Wirbelstürme (Bild: New Brunswick, NJ, nach Hurrikan Ida).

## 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.

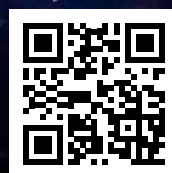
Registrierung unter:  
[spektrum.de/newsletter](https://www.spektrum.de/newsletter)

Jetzt **Spektrum** der Wissenschaft abonnieren  
und keine Ausgabe mehr verpassen!



## Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination:  
12 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder  
als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem  
von den exklusiven Vorteilen und Angeboten  
von **Spektrum** PLUS – wie kostenlosen Downloads,  
Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.



### Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

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

# DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



**Spektrum**  
die Wissenschaft

**DIE WOCHE**

NR. **03** 28.01. 2022

- > Versteilt Starlink den Blick ins Universum?
- > Das Internet als Neuroprothese
- > Das Universum enthält 40 Milliarden Milliarden Schwarze Löcher

TITELTHEMA: MULTIPLE PERSÖNLICHKEITEN

## Zersprungene Seele

Die dissoziative Identitätsstörung wirkt so unglaublich, dass manche immer noch an ihrer Existenz zweifeln. Langsam enthüllen Forscher jedoch, wie die innere Spaltung entsteht.

**KLÄRANLAGEN**  
Wie Abwasser zum Rohstoff wird

**PARASITISMUS**  
Zombie mit sechs Beinen

**GOLDMEEERKATZEN**  
Mehr Puschelprimaten braucht die Welt

Mit ausgewählten Inhalten von **nature**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im monatlich kündbaren Abonnement € 0,92 je Ausgabe; ermäßigt sogar nur € 0,69.

**Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!**

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

