

Spektrum

der Wissenschaft

Die Kriege der Zukunft

Wie lassen sie
sich verhindern?

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

COVID-19 Wie Sars-CoV-2 unser Immunsystem aus dem Gleis bringt
QUANTENPHYSIK Mit Überlichtgeschwindigkeit durch die Wand?
ALGORITHMEN Die psychologischen Tricks digitaler Manipulation



KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

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

€ 4,99
JE DIGITALE
AUSGABE



Bestellmöglichkeit und über 300 weitere Ausgaben:
www.spektrum.de/kompakt



EDITORIAL KRIEG DER STERNE

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

► Wenn ich mich an tristen Winterabenden entspannen, aber nichts lesen möchte, schaue ich gerne Sciencefiction-Filme: »Avatar«, »Interstellar«, »Star Trek« oder natürlich »Star Wars« mit dem ewigen Kampf zwischen Gut und Böse. Noch vor einigen Jahren schien ein wirklicher Krieg im All fern jeglicher Realität, doch die Zeiten haben sich leider geändert.

Denn inzwischen gilt selbst unser Orbit als strategisches Ziel. Satelliten sind für die Kommunikation und militärische Beobachtungen unverzichtbar: Ohne die tausenden Sonden im Weltraum könnten wir schlechter und langsamer Informationen austauschen, blieben beispielsweise Truppenbewegungen anderer Staaten länger verborgen und würden wir wohl auf Katastrophen verzögert reagieren.

Gleichzeitig sind Satelliten schlecht vor Attacken geschützt, und es fehlt ein internationales Regelwerk dazu, was im All erlaubt ist und was nicht. Manche schaffen daher bereits Tatsachen: In den USA ernannte der damalige Präsident Donald Trump die US Space Force 2019 zur unabhängigen militärischen Abteilung. China und Indien haben bereits eigene Satelliten mit Lenk Waffen beschossen. Und auch Russland rüstet für Auseinandersetzungen im Weltraum auf.

Droht also bald ein Krieg im All? Ann Finkbeiner schreibt in unserem Titelthema (S. 12), wie realistisch ein derartiges Szenario ist und wie man den Frieden im extraterrestrischen Raum wahren könnte. Denn so spannend die Schlachten zwischen Aliens und Menschen oder zwischen der dunklen Seite der Macht und den Jedi-Rittern im Film sein mögen: Im wahren Leben ist mir der Frieden auch jenseits der Erdkugel lieber.

In diesem Zusammenhang lege ich Ihnen zudem das Interview mit Reinhard Grünwald nahe (S. 22). Er erzählt, welche Fähigkeiten autonome Waffensysteme bereits heute besitzen. Der Krieg wird weiter entmenschlicht.

Besorgt grüßt



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum SPEZIAL** Biologie – Medizin – Hirnforschung 1.21 gibt einen Überblick über die aktuellen Herausforderungen der modernen Medizin: von Covid-19 bis zu Antibiotikaresistenzen.

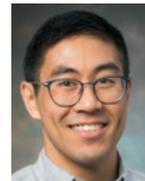
IN DIESER AUSGABE



BÜRO FÜR TECHNIFOLGENABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESMILITÄR

REINHARD GRÜNWALD

Der Technikfolgenforscher hat den Stand autonomer Waffensysteme untersucht. Im Interview ab S. 22 erklärt er, warum diese eine große Gefahr sind.



AKIKO IWASAKI, PATRICK WONG

Wie das neue Coronavirus unser Immunsystem durcheinanderbringt, erläutern die beiden Immunologen von der Yale University ab S. 44.



ANDRÉS WILMAYES

MARTIN GOLDSTERN, JAKOB KELLNER

Die Mathematiker von der Technischen Universität Wien erforschen die Grundlagen der Mathematik. Ab S. 74 beschreiben sie, wie sie die Größe von mehreren unendlichen Mengen bestimmen und ordnen können.

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

28 FORSCHUNG AKTUELL

Das Erbgut in Mitochondrien reparieren

Eine neue Genschere für mtDNA.

Unordentliche Graphen

Große Netzwerke sind chaotischer als gedacht.

35 SPRINGERS EINWÜRFE

Neue Energie für Afrika

Lässt sich fossile Energiegewinnung überspringen?

64 SCHLICHTING!

Widerspenstiger Ketchup

Die Konsistenz der Soße wechselt je nach Einwirkung.

83 FREISTETTERS FORMELWELT

KI und Kurvendiskussion

Spannend wird es, wenn eine KI nach Extrema sucht.

88 REZENSIONEN

94 ZEITREISE

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

12 KÜNFTIGE KRIEGE **ANGRIFF IM ORBIT**

Satelliten könnten zur Zielscheibe kriegerischer Auseinandersetzungen werden. Die Flugkörper zu schützen, ist schwierig – und es fehlen ausreichend verbindliche Regeln für das Verhalten im All.

Von Ann Finkbeiner

22 INTERVIEW **AUTONOME WAFFEN**

Reinhard Grünwald ist Experte für Technikfolgenforschung. Im Gespräch beschreibt er, wie künstliche Intelligenz die Schlachtfelder der Zukunft verändern könnte.

Von Robert Gast

36 PALÄOANTHROPOLOGIE

VERWIRRENDE VIELFALT DES *HOMO ERECTUS*

Der Vorläufer von *Homo sapiens* verblüfft durch seine Uneinheitlichkeit.

Von Thorwald Ewe

44 COVID-19 **IMMUNABWEHR IM CHAOS**

Das neue Coronavirus kann die Abwehrsysteme unseres Körpers massiv durcheinanderbringen – oft mit tödlichen Folgen.

Von Akiko Iwasaki und Patrick Wong

52 MEDIZIN **SIEGESZUG DER RNA-IMPfstOFFE**

Die Covid-19-Pandemie hat weit reichende Folgen für die Impfstoffentwicklung: Sie beschleunigt deren Arbeitsabläufe dramatisch.

Von Elie Dolgin

58 QUANTENPHYSIK

MIT ÜBERLICHTGESCHWINDIGKEIT DURCH DIE WAND

Wenn quantenmechanische Objekte Hindernisse »durchtunneln«, bewegen sie sich möglicherweise sogar schneller als das Licht.

Von Natalie Wolchover

66 PHYSIK **DIE PLASMA-TRAUMFABRIK**

Nach vielen Verzögerungen hat die Montage des Kernfusionsreaktors ITER begonnen. Fotos zeigen die gewaltige Dimension des Projekts.

Von Clara Moskowitz

74 MATHEMATIK **ORDNUNG IN DEN UNENDLICHKEITEN**

Serie: Unendlichkeiten (Teil 2) Lange grübelten Mathematiker über die Größen von zehn unendlichen Mengen – und haben nun eine Antwort: Sie unterscheiden sich alle!

Von Martin Goldstern und Jakob Kellner

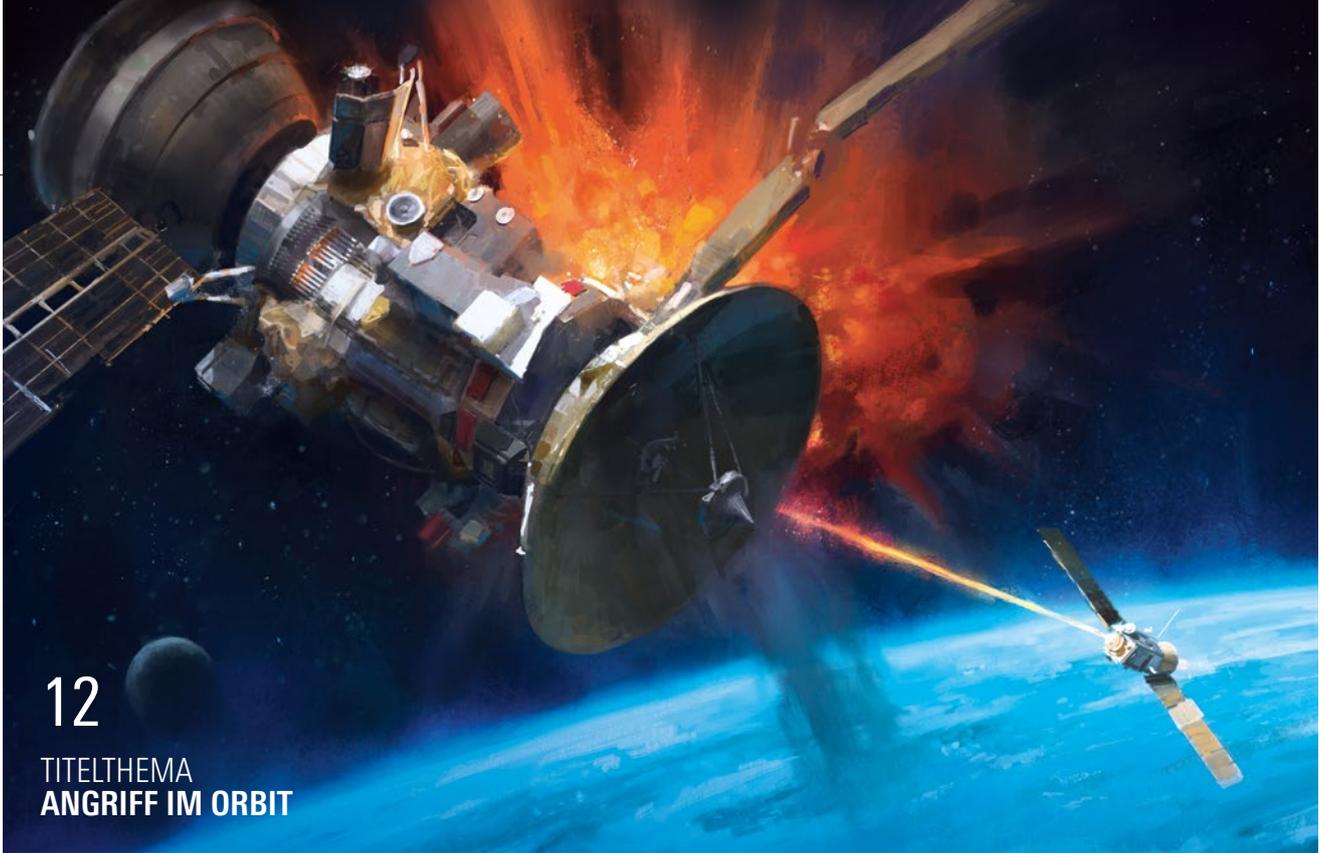
84 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

DIE GEHEIMNISSE DER ZAHL 42

Wie eine gewöhnliche Zahl die Aufmerksamkeit von Nerds erlangte und weshalb sie auch Mathematiker fasziniert.

Von Jean-Paul Delahaye

TITELBILD:
JOHN ANTHONY DI GIOVANNI;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



12

TITELTHEMA
ANGRIFF IM ORBIT

JOHN ANTHONY DI GIOVANNI



36

HOMO ERECTUS
VIELFÄLTIGER
FRÜHMENSCH

NEANDERTHAL MUSEUM



44

COVID-19
ENTGLEISTE
IMMUN-
REAKTION

CDC / AUISA ECERT, NSM UND DAN HIGGINS, MAAS;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

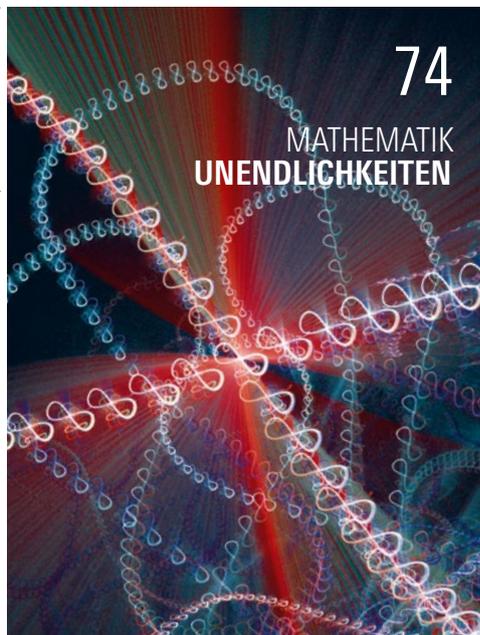


66

PHYSIK
ITER

MIT PROF. GEN. VON STEN GEIER
(WWW.SPEKTRUM/PHYSIK/ITER/PHI)

MANUELA SCHIRKA UND FABRIZIO GIRALDI



74

MATHEMATIK
UNENDLICHKEITEN



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

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

EMBRYOS AUS DER PETRISCHALE

► Um jene frühen Prozesse zu beobachten, die dem heranwachsenden Tier seine Gestalt geben, haben Jesse Veenvliet vom Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin und sein Team Teile von Mäuseembryonen in der Petrischale heranwachsen lassen. Hierzu betteten sie zunächst Mäuse-Stammzellen in ein gelartiges Nährmedium ein. Es besaß ähnliche Eigenschaften wie die so genannte extrazelluläre Matrix: eine gallertige Substanz, die im Körpergewebe zwischen den Zellen liegt und vor allem aus Strukturproteinen und Zuckerverbindungen besteht. Das zähe Nährmedium bot den Stammzellen Halt sowie Orientierung und ermöglichte ihnen, sich bis zu fünf Tage lang weitgehend so zu entwickeln, wie das beim natürlichen Wachstum des Embryos in der Gebärmutterschleimhaut geschieht.

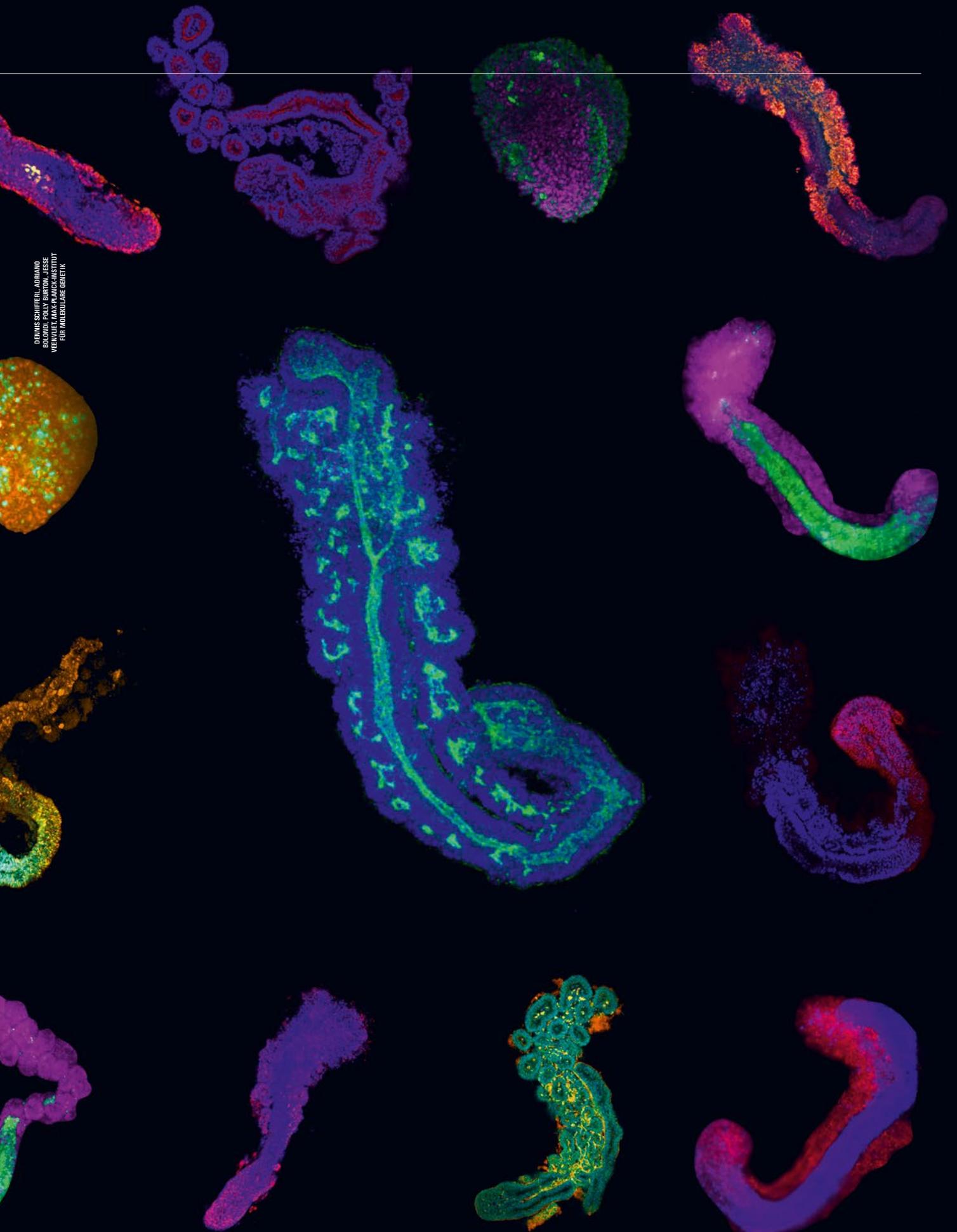
Das Bild zeigt die entstehenden Gebilde in verschiedenen Entwicklungsstadien und angefärbt mit Fluoreszenzmarkern. Erkennbar ist, wie einerseits allmählich ein Neuralrohr entsteht, aus dem später das Rückenmark hervorgeht, und andererseits »Somiten« wachsen – Ursegmente, die Skelettteile, Knorpel und Muskeln hervorbringen. Auch erscheinen Vorläuferstrukturen innerer Organe wie des Darms. Einige Gebilde haben infolge chemischer Behandlung eine gestörte Entwicklung durchlaufen und übermäßig viele Ursegmente ausgebildet, die wie Weintrauben angeordnet sind.

Derartige Vorgänge lassen sich bei Säugetieren normalerweise nur schwer beobachten. Denn ihre Embryonen sind kaum noch zugänglich, sobald sie sich in die Gebärmutter eingenistet haben. Das neue Verfahren ermöglicht es, die frühe Embryonalentwicklung in Zellkultur zu verfolgen und zu untersuchen, welche biochemischen und genetischen Signale sie steuern.

Science 370, eaba4937, 2020

DEINIS SCHIFFERL, ADRIANO BOLONDI, POLLY BURTON, JESSE VEENVLIET, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MOLEKULARE GENETIK

DENNIS SCHIFFERL, ADRIANO
BOLOGNI, POLLY BURTON, JESSE
VEEVUDET, MAX PLANCK INSTITUT
FÜR MOLEKULARE GENETIK



SPEKTROGRAMM

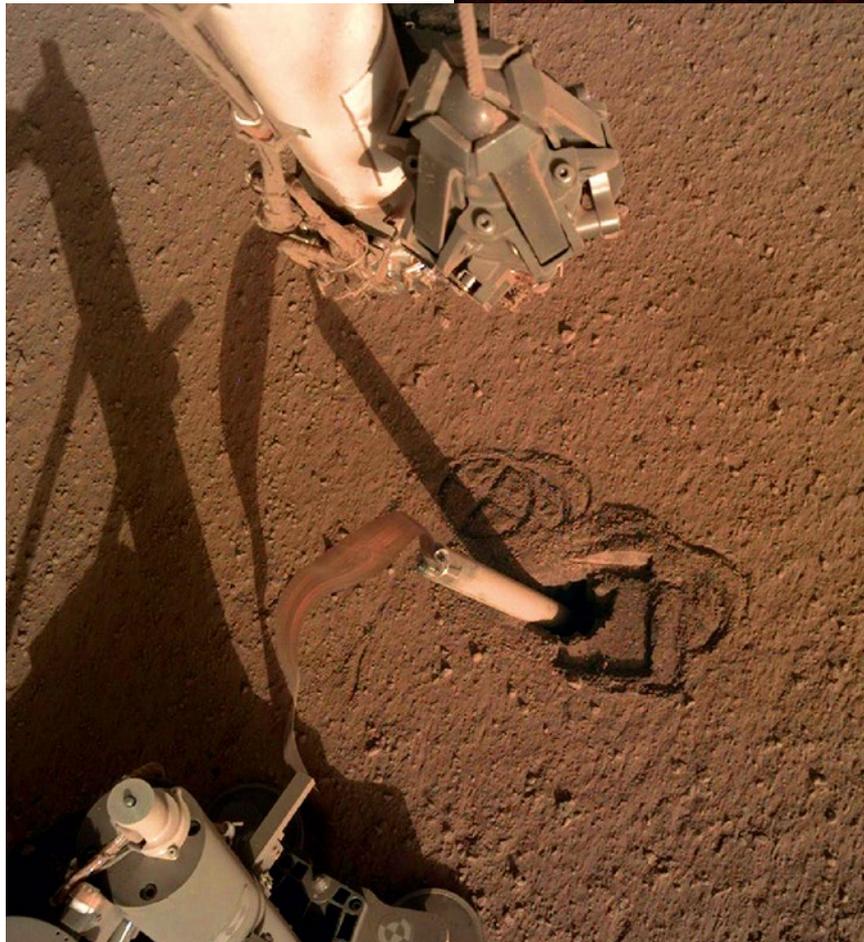
SONNENSYSTEM DER MARSMALWURF GIBT AUF

► Alle Notlösungen und Experimente waren vergebens: Der »Marsmaulwurf« ist gescheitert. Die Messsonde ist eines von drei Experimenten an Bord der 2018 gelandeten NASA-Mission InSight. Sie ähnelt einem 40 Zentimeter langen Nagel, der sich selbst in den Boden hämmern kann. In den vergangenen zwei Jahren hat das ferngesteuerte Gerät immer wieder versucht, fünf Meter in die Tiefe des Roten Planeten vorzudringen, um dort Temperatur und Wärmefluss zu messen. Doch der Maulwurf fand partout keinen Halt und rutschte immer wieder in die Ausgangslage zurück.

Am 9. Januar 2021 haben die Missionsplaner einen letzten Versuch unternommen. Im Vorfeld hatte



INSIGHT Der NASA-Roboter hat drei Messgeräte an Bord (Visualisierung oben). Die Temperatursonde HP3 konnte nicht wie geplant in den Marsboden vordringen, trotz Hilfe des Roboterarms (Foto unten).



InSight seinen Roboterarm genutzt, um den Messstab einige Zentimeter in den Sand zu drücken. Anschließend versuchte die Rammsonde, sich in den Boden vorzuarbeiten. 500 Schläge führte sie aus, aber der sandige Untergrund lieferte erneut nicht genug Reibung. Einen weiteren Anlauf werde es nicht geben, berichtet das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das den Maulwurf entworfen hat.

Zum Graben nutzte der Temperaturfühler ein Gewicht im Inneren so: Von einer Art Feder wird die Masse immer wieder angehoben und schlägt anschließend gegen die Spitze des Stabs. Dass das Konzept nicht funktioniert hat, liegt laut DLR an der überraschenden Bodenbeschaffenheit der Landestelle von InSight: Diese weiche deutlich von den Böden ab, welche die Rover Spirit und Opportunity in den 2010er Jahren untersucht hatten und die die Basis für die Entwicklung des Marsmaulwurfs bildeten.

Pressemitteilung des DLR, Januar 2021

MATERIALWISSENSCHAFT WIE SICH PERLMUTT SELBST PERFEKTIONIERT

► Wenn eine Muschel Perlmutter produziert, lagert sie an ihrer Schale immer neue Schichten aus Kalziumkarbonat ab. Unter dem Mikroskop erkennt man, dass sie aus winzigen Plättchen bestehen, die sich extrem regelmäßig aneinanderreihen. Bemerkenswerterweise wird diese Anordnung mit der Zeit immer gleichmäßiger; die Plättchen finden sich wie Atome in einem Kristall zu einer regelmäßigen Struktur zusammen, die dem Material schließlich seinen attraktiven Glanz verleiht.

Ein Team um Igor Zlotnikov von der Technischen Universität Dresden ist nun der Frage nachgegangen, wie die Muscheln – oder genauer gesagt die Millionen von Zellen, die unabhängig

voneinander das Baumaterial absondern – eine derart fehlerfreie Oberfläche produzieren können.

Wie die Gruppe herausgefunden hat, bedarf es dazu keineswegs eines übergeordneten Steuerungsmechanismus. Tatsächlich verläuft der Wachstumsvorgang zu Beginn völlig unsystematisch. Erst mit der Zeit macht sich ein Prozess der Selbstorganisation bemerkbar, der bei gereiftem Perlmutter zu einem regelmäßigen Muster führt.

Schon länger bekannt war, dass alle Defekte im Schichtaufbau eine Händigkeit aufweisen, das heißt, sie sind wie die Spiralen von Wendeltreppen entweder linksdrehend oder rechtsdrehend. Die strukturelle Unordnung, die

jeder Defekt auslöst, macht sich selbst noch in größerer Distanz bemerkbar und beeinflusst in diesem Umkreis, wie sich neue Plättchen bevorzugt anordnen.

Das hat weit reichende Konsequenzen, wie das Team jetzt mit Hilfe extrem hochauflösender Analyseverfahren an der European Synchrotron Radiation Facility in Grenoble nachwies: Mit jeder neuen Schicht nähern sich Defekte entgegengesetzter Händigkeit einander an. Dabei wachsen sie so lange aufeinander zu, bis sie sich treffen – und dabei gegenseitig auslösen. Die Oberfläche wird dadurch immer gleichmäßiger.

Nature Physics 10.1038/s41567-020-01069-z, 2021

BOTANIK EIN EXTREM SELTENER EXOT

► Mehr als 1400 Pflanzenarten kennt man von den Hawaii-Inseln, rund 90 Prozent davon wachsen nur dort. Jetzt ist die Sammlung um eine Spezies reicher, und dabei handelt es sich zugleich um eine ausgesprochene Rarität: Nur ein einziges Exemplar von *Cyanea heluensis* entdeckten Hank Oppenheimer und Jennifer Higashino trotz intensiver Suche in den Schluchten des Mauna Kahalawa auf Maui. Der Fund gelang den beiden bereits

2010, doch erst vor Kurzem haben sie ihn wissenschaftlich vermerkt.

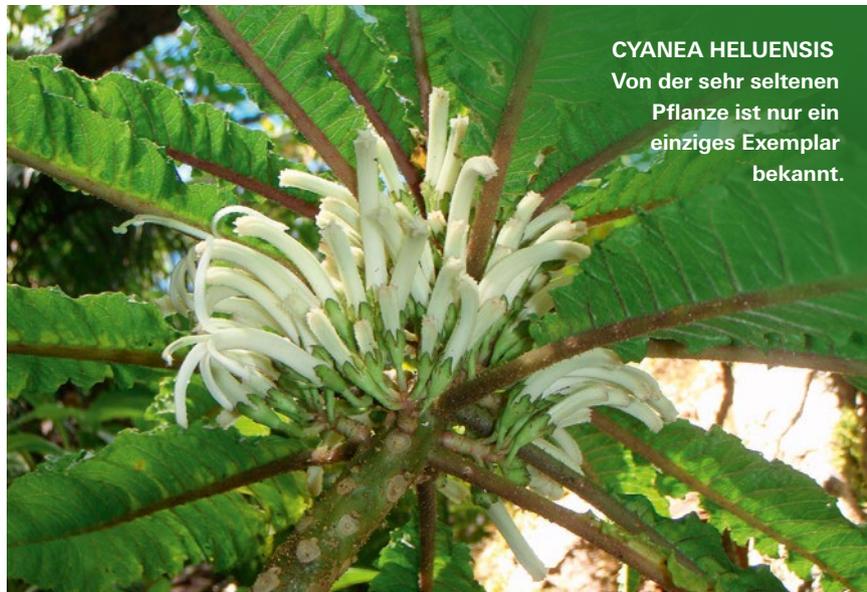
Die Biologen hatten die Pflanze zunächst mit einer speziellen Paste zu stärkerem Wachstum angeregt, um dann über einen Ableger ein neues Individuum im botanischen Garten zu ziehen. Das misslang zwar, aber das Forscherduo konnte einen Samen von *Cyanea heluensis* sammeln, aus dem schließlich eine weitere Pflanze wuchs. Sie gehört zur Gruppe der Lobeliengewächse, die auf den Hawaii-Inseln rund 80 verschiedene Arten hervorgebracht hat. Sie gehen alle auf einen gemeinsamen Vorfahren zurück, der vor acht bis zehn Millionen

Jahren auf der Inselkette angekommen sein muss.

Cyanea heluensis unterscheidet sich von ihren Verwandten deutlich durch die Form der Blätter und ihre weißen Blüten. Oppenheimer wurde dadurch auf sie aufmerksam, als er mit einem Fernglas die Hänge des Untersuchungsgebiets absuchte. Die Pflanze wächst an einem sehr schattigen Ort in einem entlegenen Canyon des Vulkans auf Maui. Wahrscheinlich wird die Art durch Vögel bestäubt, die ihre orange gefärbten Beeren fressen und so ihre Samen verbreiten.

Viele der ursprünglichen Vogelarten der Inselkette wurden allerdings in den letzten Jahrhunderten ausgerottet oder gingen im Bestand extrem zurück. Womöglich fehlt daher auch der Bestäuber des neu entdeckten Gewächses. Zudem fressen eingeschleppte Schnecken sowie Ratten Früchte, Samen und Blätter, was die Art weiter bedroht. Hinzu kommen natürliche Risiken wie Erdbeben in dem steilen Gelände. Oppenheimer und Higashino stufen *Cyanea heluensis* deshalb direkt als vom Aussterben bedrohte Art ein.

PhytoKeys 10.3897/phytokeys.167.55107, 2021



CYANEA HELUENSIS
Von der sehr seltenen Pflanze ist nur ein einziges Exemplar bekannt.

PHYSIK PERFEKTER TUNNELEFFEXT IN METAMATERIAL

► Im Jahr 1929 machte der schwedische Physiker Oskar Klein eine verblüffende Vorhersage: Feuer man ein Elektron auf eine Barriere, kann es einfach hindurchschlüpfen. Eigentlich ist dieser Tunneleffekt in der Quantenwelt nichts Ungewöhnliches, wie Forscher damals bereits wussten. Er ist immer eine Möglichkeit, wenn ein Teilchen einem Hindernis begegnet.

Normalerweise kann ein Partikel aber nur mit Glück auf die andere Seite gelangen. Oskar Klein hingegen kam in seinen Rechnungen auf eine Wahrscheinlichkeit von 100 Prozent: Bewegt

sich das Elektron fast mit Lichtgeschwindigkeit, nimmt es die Barriere nicht wahr – egal, wie groß diese tatsächlich ist.

In der Realität lässt sich die Situation leider nur schwer nachstellen. Seit einigen Jahren gehen Forscher jedoch indirekten Hinweisen im 2-D-Material Graphen nach. In dem hauchdünnen Kohlenstoffgitter agieren Elektronen manchmal im Kollektiv und lassen sich gemeinschaftlich als lichtschnelle, masselose »Quasiteilchen« beschreiben. In speziellen Situationen scheinen sie dabei auf kleinsche Art durch Barrieren zu tunneln.

Forscher um Xiang Zhang von der University of California in Berkeley haben das Phänomen nun in einem leichter zu studierenden System direkt beobachtet: Sie ordneten etliche wenige Zentimeter große Acrylzyylinder

auf einer Fläche an und ließen Schallwellen von der Seite hindurchlaufen. So entstand das, was Forscher einen »phononischen Kristall« aus der Klasse der Metamaterialien nennen. Letztere bestehen aus vielen identischen Bauteilen, die durch ihre Form Wellen gezielt verändern.

Im Experiment der Physiker modifizierten die Zylinder die Schallwellen gerade so, dass sie sich mit ähnlichen Gleichungen beschreiben lassen wie Quasiteilchen in Graphen: Die Anregungen durchliefen verlustfrei einen Bereich mit kleineren Bauteilen, obwohl gewöhnliche Schallwellen hier eigentlich abgeschwächt werden sollten. Dieses akustische Tunneln gelang selbst dann noch in 100 Prozent der Fälle, wenn die Forscher die Hürde vergrößerten – ganz so wie von Oskar Klein vorhergesagt.

Science 10.1126/science.abe2011, 2021

ZOOLOGIE SCHLANGE KLETTERT MIT »LASSOTECHNIK«

► In den 1940er oder 1950er Jahren setzten Menschen auf der Pazifikinsel Guam Braune Nachtbaumnattern (*Boiga irregularis*) aus. Die nachtaktiven Schlangen richteten bald Verheerungen unter den einheimischen Vögeln an: Zehn der zwölf beheimateten Arten starben aus. Um die verbliebenen Brutpaare zu schützen, versahen Biologen Nistkästen und Bäume mit Klettersperren aus Rohren.

Doch diese zeigten nicht die erhoffte Wirkung: Die Schlangen erklimmen immer wieder die glatten, bis 20 Zentimeter dicken Zylinder. Wie sie das schafften, war lange ein Rätsel. Bis ein Team um Julie Savidge von der Colorado State University in Fort Collins schließlich per Überwachungskamera einer Schlange dabei zusah, wie sie mit einer völlig unbekannt Klettertechnik das Rohr emporkroch.

Das Reptil bildet dabei mit seinem Körper einen eng anliegenden Ring um den Zylinder, der einen Teil des Körpers mindestens einmal überkreuzt. Um vorwärtszukommen, macht die Schlange wellenförmige, an eine Raupe erinnernde Bewegungen, bei

denen sie nur einzelne Partien ihres Körpers vom Untergrund abhebt. Auf die Dauer gelingt es ihr so, ihren um den Zylinder geschlungenen Körper langsam nach oben wandern zu lassen.

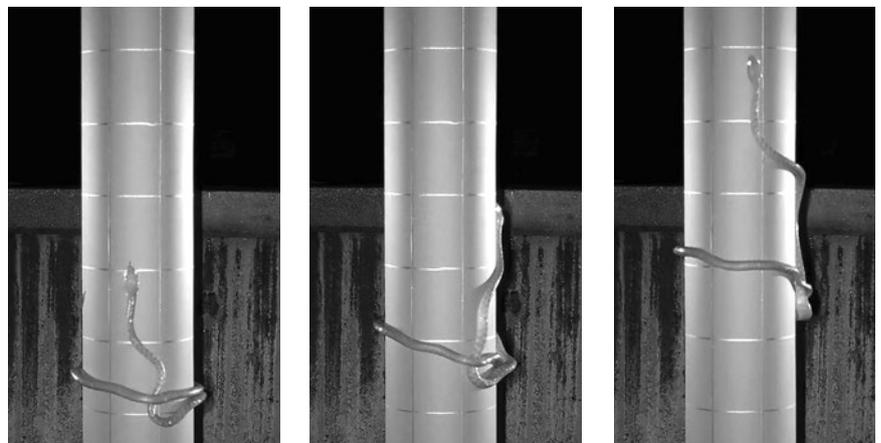
Damit sei zum ersten Mal seit rund 100 Jahren eine neue Fortbewegungsart bei Schlangen entdeckt worden, schreibt das Team: Die Zahl der bekannten Techniken wachse von vier auf fünf. Im Normalfall erklimmen Schlangen Bäume oder Röhren vor allem nach dem Ziehharmonika-

KLETTERRKÜNSTLER Nachtbaumnattern können ihren Körper wie eine Art Lasso einsetzen.

prinzip. Die Tiere umschließen dabei den Baum sowohl mit ihrer vorderen als auch ihrer hinteren Partie. Die beiden Haltegriffe verschieben sie dann abwechselnd nach oben.

Die »Lassotechnik« erlaubt es den Schlangen hingegen, Bäume (oder Rohre) mit viel größerem Durchmesser zu erklimmen. Allerdings hat das offenbar seinen Preis: Die Reptilien atmeten unterwegs heftig und machten häufige Pausen. Und weil sie zudem immer wieder ein Stückchen abrutschten, kletterten sie nur sehr langsam nach oben. Auf Guam sollen die neuen Erkenntnisse künftig dabei helfen, bessere Klettersperren zu entwickeln.

Current Biology 10.1016/j.cub.2020.11.050, 2021



THOMAS SEIBERT, COLORADO STATE UNIVERSITY

ARCHÄOLOGIE NEUER REKORD BEI STEINZEITLICHER MALEREI

► Auf der indonesischen Insel Sulawesi haben Archäologen die wohl älteste bekannte Malerei entdeckt. Es handelt sich um das Bild von mindestens drei Sulawesi-Pustelschweinen (*Sus celebensis*). Forscher um Maxime Aubert von der Griffith University in Australien datierten eine der Darstellungen auf ein Alter von mindestens 45 500 Jahren. Sie gehen davon aus, dass die übrigen Tierbildnisse genauso alt sind.

Die mit rotem Ocker aufgetragenen Malereien zieren eine Wand in der Höhle Leang Tedongge im Karstgebiet von Maros-Pangkep. Das am besten erhaltene Bild untersuchten die Forscher mit der Uran-Thorium-Methode. Dabei bestimmt man das Mengenverhältnis von Uran und dessen Zerfallsprodukten in den Kalkschichten. Daraus lässt sich deren grobes Alter ableiten, das zugleich ein Mindestalter für Felsmalereien liefert.

Dass es sich bei den Darstellungen um Pustelschweine handelt, machen die Forscher an den spitzen Erhebungen am Kopf fest. Das Team deutet sie



HÖHLENKUNST Diese Wandmalerei (deren Farben hier verstärkt wurden) bestand einst aus vier Schweinen, drei davon in der rechten Bildhälfte.

als die typischen Schwellungen (Pusteln) im Augenbereich der Tiere. Als Urheber der Bilder kommt in erster Linie *Homo sapiens* in Frage.

Die Malereien scheinen etwas älter zu sein als der bisherige, erst 2019 entdeckte Rekordhalter: Die Felszeichnungen aus der Höhle Leang Bulu' Sipong 4 im Süden Sulawesi zeigen

ebenfalls Tiere, kommen aber vermutlich nur auf 43 900 Jahre. Bereits 2018 waren Archäologen auf Borneo auf eine 40 000 Jahre alte Höhlenmalerei gestoßen. Bis dahin galten Figürchen von der Schwäbischen Alb als älteste bekannte Kunst der Welt.

Science Advances 10.1126/sciadv.abd4648, 2021

ADHA OKTAWIANA, GRIFFITH UNIVERSITY

BIOLOGIE FRIERENDE PANDAS SCHÜTZEN SICH MIT PFERDEMIST

► Pandabären scheinen auf ein besonderes Rezept gegen Kälte zu setzen: Pferdemist. Das jedenfalls folgert eine Arbeitsgruppe um Fuwen Wei von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking aus dem merkwürdigen Verhalten wild lebender Großer Pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) beiderlei Geschlechts: Die Tiere schnuppern zunächst an aufgefundenen Pferdeäpfeln und reiben sich dann damit über die Wangen, wälzen sich darin und schmieren schließlich weitere Körperpartien ein.

Zwischen 2016 und 2017 beobachteten die Forscher diese Mistkur genau 38-mal. Die Pandas führten sie ausschließlich bei Temperaturen unter

15 Grad Celsius durch und taten das umso häufiger, je kälter es war. Zudem spielte der Zustand der Hinterlassenschaften eine Rolle: je frischer, desto besser. Womöglich setzen die Tiere auf einen Kälteschutzeffekt, der durch eine Substanz im Pferdekot vermittelt wird, spekuliert das Team. In Frage kommen dafür Beta-Caryophyllene sowie Caryophyllenoxid – sekundäre Pflanzenstoffe, die mitunter in ätherischen Ölen enthalten sind. Sie können eventuell die Kälterezeptoren der Pandas blockieren und damit deren Empfindlichkeit verringern, so die Wissenschaftler.

Ihre Hypothese testeten sie im Peking Zoo. Dort boten sie Pandas bei niedrigen Außentemperaturen

verschiedene Pferdemistmischungen an, denen unterschiedliche Substanzen beigemischt waren. Tatsächlich bevorzugten die Tiere mit Caryophyllenen angereicherten Kot.

Anders als andere große Bären halten Pandas weder Winterschlaf noch Winterruhe – vermutlich weil sie sich mit ihrer speziellen Nahrung nur schwer einen Winterspeck anfressen können. Dies ist auch nicht nötig, da der immergrüne Bambus in ihrem Lebensraum ständig zu finden ist. Fallen die Temperaturen, dann wandern die Tiere der Wärme möglichst hinterher – wobei ihnen Pferdemist in kurzen Kälteperioden offenbar beim Durchhalten hilft.

PNAS 10.1073/pnas.2004640117, 2020



LASERATTACKE Satelliten könnten in Kriegen der Zukunft zu einer strategisch wichtigen Zielscheibe werden.

KÜNFTIGE KRIEGE ANGRIFF IM ORBIT

Satelliten sind heute unverzichtbar, aber nur schwer vor möglichen Aggressionen zu schützen. Wie lässt sich ein Kampf im All verhindern?

Ann Finkbeiner ist Wissenschaftsautorin in Baltimore, USA. Sie schreibt über Astronomie, Kosmologie sowie das Wechselspiel von Wissenschaft und nationaler Sicherheit.



» [spektrum.de/artikel/1823114](https://www.spektrum.de/artikel/1823114)

Was der Amateur-Satellitenbeobachter am 30. Januar 2020 beim Kurznachrichtendienst Twitter schrieb, klingt wie aus einem futuristischen Spionagethriller: Cosmos 2542, ein russischer Beobachtungssatellit, würde den amerikanischen Spionagesatelliten USA 245 verfolgen, wobei der Abstand zwischen 150 und 300 Kilometern schwanke. USA 245 veränderte seine Umlaufbahn, um seinem Verfolger zu entkommen. Daraufhin passte auch Cosmos 2542 seine Flugbahn an, irgendwann waren die beiden Objekte lediglich 20 Kilometer voneinander entfernt. Das seien alles nur Indizien, schrieb der Beobachter, aber viel deutete darauf hin, dass ein russischer Satellit gerade sein US-Pendant inspiziere.

Die Tweets erregten die Aufmerksamkeit von Laura Grego, einer Astrophysikerin und Weltraumtechnologin, die im Rahmen ihrer Forschungsarbeit Satelliten katalogisiert. Schon vor Jahren hat sie damit begonnen, den Austausch zwischen Amateurbeobachtern zu verfolgen. Vor Szenarien wie dem beschriebenen Vorfall fürchten sich Fachkundige wie sie, könnten sie doch einen Krieg im Weltraum auslösen. Ein solcher wäre keine gewalttätige Auseinandersetzung, bei dem sich die Parteien im Orbit gegenseitig erschießen. Es wäre auch keine Kampfhandlung, die von großer Höhe ausgeht. »Satelliten werfen keine Bomben ab«, sagt Grego. »Da gibt es bessere, schnellere oder preiswertere Alternativen.« Stattdessen bedeutet Weltraumkrieg: Angriff auf Satelliten. Mit entsprechender Ausrüstung hätte Cosmos 2542 seinen Gegenspieler beschädigen oder sogar in Stücke sprengen können. Wäre dergleichen passiert, wäre es vermutlich zu einem Gegenschlag der USA gekommen – etwa durch die Zerstörung eines russischen Raumflugkörpers. Und schon hätte der erste Krieg im Weltall begonnen.

Die meisten Länder der Erde sind erheblich von zivilen Satelliten abhängig, die etwa Signale für GPS, Kreditkartentransaktionen, Krankenhaussysteme, Fernsehstationen und Wetterberichte übertragen. Die Liste der von ihnen versetzten Dienste ist schier endlos, und viele Bereiche unserer modernen Gesellschaft funktionieren nicht mehr ohne sie.

AUF EINEN BLICK KAUM REGELN IM ALL

- 1 Moderne Gesellschaften sind auf vielfältige Weise von den Diensten ihrer Satelliten abhängig. Attacken auf diese Systeme könnten daher schwer wiegenden Schaden anrichten.
- 2 Hobbybeobachter berichten bereits von Satelliten, die andere verfolgten. Was im Orbit erlaubt ist und was nicht, ist jedoch nicht offiziell geregelt.
- 3 Ein internationales Abkommen zum Weltraumrecht könnte die Gefahr einer kriegerischen Auseinandersetzung im All minimieren – noch sind aber viele Fragen ungeklärt.

Insbesondere die USA sind zusätzlich auf ihre militärischen Kommunikations- und Überwachungssatelliten angewiesen. Daher könnte ein Weltraumkrieg für die amerikanischen Staaten dramatische Folgen haben – wohl mehr als für jede andere Nation.

Da sich Satelliten als helle Punkte auf vorhersehbaren Umlaufbahnen bewegen, sind sie im Grunde eine leichte Beute. Sie ausreichend zu verteidigen, ist fast unmöglich. Daher würden Militärs den Weltraum wohl als »offensiv-dominante« Umgebung klassifizieren, was so viel bedeutet wie: Angriff ist dort eine einfachere und billigere Strategie als Verteidigung.

Die USA reagierten im Januar 2019 auf die Bedrohung, indem sie die unabhängige militärische Abteilung United States Space Force schufen, mit der Begründung, Russland und China hätten das All »bewaffnet«. Der Weltraum sei ab nun ein Ort, an dem Kriegshandlungen denkbar wären. Die Space Force solle dabei dem Schutz der US-amerikanischen Satelliten dienen.

Der Vorfall mit Cosmos 2542 hätte das Potenzial gehabt, eine »brandgefährliche Situation im Weltraum zu schaffen«, wie der damalige Chef der Space Force, General John Raymond, gegenüber dem »Time Magazine« betonte. Bis heute wissen jedoch weder Grego noch die Amateurbeobachter, was der russische Satellit damals tatsächlich im Schilde führte. Ihre naheliegendste Vermutung ist, dass er sie provozieren oder einschüchtern und im besten Fall etwas beobachten wollte, was nicht für seine Augen bestimmt war. Denn er verhielt sich ähnlich, wie man es von russischen Fisch-Trawlern kennt. Diese nähern sich immer wieder amerikanischen Navy-Schiffen mit genau diesem Ziel.

Wie nah dürfen sich Satelliten kommen?

Mitte März 2020 twitterte der eingangs erwähnte Amateurbeobachter schließlich, dass USA 245 ein Manöver durchgeführt habe, das ihn für die kommenden Wochen, wenn nicht Monate, tausende Kilometer weit weg von seiner ursprünglichen Bahn führe. Anschließend flog auch Cosmos 2542 woanders hin. Laura Grego antwortete damals auf den Tweet Folgendes: »Ein guter Zeitpunkt, um eine gemeinsame Auffassung darüber zu entwickeln, wie nah zu nah ist.«

Die Astrophysikerin ist Teil der Union of Concerned Scientists, einer gemeinnützigen Organisation, die sich mit der Gefahr eines Weltraumkriegs beschäftigt. Laut deren Mitgliedern ließen sich kriegerische Auseinandersetzungen im Weltall am ehesten durch den Abschluss eines internationalen Abkommens verhindern. Die Verhandlungen dazu sind allerdings festgefahren. »Diplomaten arbeiten nie schnell«, meint Grego, doch im Moment würde überhaupt nichts mehr vorangehen.

Dabei ist die Bedrohung eskalierender Kampfhandlungen im Orbit mit unkalkulierbaren Konsequenzen für die Zivilbevölkerung real. Das bestätigt nicht nur der Vorfall mit Cosmos 2542, sondern auch Aussagen von Experten deuten darauf hin: »Ich kann zwar nicht sagen, ob ein Weltraumkrieg unmittelbar bevorsteht«, sagt John Lauder, der mehr als 30 Jahre an Überwachungsmaßnahmen des amerikanischen Geheimdienstes zur Rüstungskontrolle anderer Staa-

Deutschland und seine Satelliten

Der erste deutsche Satellit startete im Jahr 1969 an Bord einer amerikanischen Scout-Rakete von Vandenberg, Kalifornien. Weil seine Solarpaneele bläulich schimmerten, taufte man ihn »Azur«. Er sollte für ein Jahr Daten über die kosmische Strahlung und ihre Wechselwirkung mit der Magnetosphäre liefern. Am 29. Juni 1970 brach die Verbindung zu Azur jedoch aus ungeklärten Gründen ab, und seither umkreist er stumm die Erde. Die Bundesrepublik Deutschland war damit die siebte Nation mit Satelliten im All.

In den 1970er Jahren folgten weitere deutsche Satelliten, etwa Dial und Aeros 1 und 2, die der Erforschung der oberen Atmosphäre dienten, oder Symphonie 1 und 2, deutsch-französische Koproduktionen und die ersten geostationären Kommunikationssatelliten aus Europa. Ende der 1980er Jahre kamen TV-Sat 1 und 2 dazu. Die Geräte waren die bis dahin schwersten kommerziellen Kommunikationssatelliten und sollten eine neue Fernsehnorm einführen. Das missglückte, und die beiden umkreisen die Erde schon seit Jahrzehnten auf so genannten »Friedhofumlaufbahnen«.

Der Röntgensatellit ROSAT ist der bislang größte deutsche Satellit. Er flog im Jahr 1990 an Bord einer US-amerikanischen Delta-II-Trägerrakete von Cape Canaveral in den USA ins All. Mit ihm gelang eine vollständige Durchmusterung des Himmels in hoher Auflösung. Der 1999 gestartete Satellit ABRIXAS war ein preiswerter Nachfolger von ROSAT. Allerdings fiel bereits drei Tage nach Missionsbeginn seine Batterie aus, und der Flugkörper wurde unbrauchbar. Erfolgreicher war der Kleinsatellit CHAMP, der rund ein Jahr später in den Orbit gesendet wurde und unter anderem das Magnet- und Schwerefeld der Erde vermaß. Erst nach zehn Jahren – mehr als dem Doppelten der geplanten Missionszeit – verglühte CHAMP beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre. In der deutsch-amerikanischen Nachfolgemission GRACE, die im Jahr 2002 begann, vermaßen zwei Satelliten das Gravitationsfeld der Erde für viele Jahre.

Die deutsche Präsenz im All diente also über Jahrzehnte lediglich der Forschung oder der Kommunikation. In militärischen Fragen verließ man sich auf den Partner USA. Mit SAR-Lupe, einem Satelli-

tenaufklärungssystem aus fünf identischen Kleinsatelliten, änderte sich das. Seit Ende 2007 sendet es hoch aufgelöste Bilder der Erde – insbesondere von Krisenregionen, in denen die Bundeswehr aktiv ist, etwa Afghanistan. Seit etlichen Jahren plant die Bundeswehr ein neues, leistungsfähigeres Radar-Aufklärungssystem, SARah, bestehend aus drei Satelliten. Der Start verzögerte sich aber immer wieder und ist nun für 2021 oder 2022 angedacht. Seit 2011 nutzt die Bundeswehr außerdem SATCOMBw, ein satellitengestütztes Kommunikationssystem, das von Airbus Defence and Space betrieben wird. Es ermöglicht dem Militär unter anderem weltweit abhörsichere Telefongespräche, Videokonferenzen und Internetzugang. Zusätzlich überwachen seit September 2020 rund 50 Mitarbeiter der Luftwaffe vom neuen Operationszentrum im nordrhein-westfälischen Uedem die Flugbahnen von Satelliten und Weltraumschrott per Radar. Schrittweise soll das Personal auf bis zu 150 Soldaten aufgestockt werden. So möchte die Bundeswehr ihre eigenen Satelliten in Zukunft vor Angriffen und Kollisionen schützen.

ten beteiligt war. »Aber bestimmte Entwicklungen machen den Weltraum unsicherer«, meint er. Die Kriegsgefahr nehme rasant zu.

Schon seit Anbeginn der Satellitentechnik existieren Mittel und Wege, um die Flugkörper aufzuspüren und sogar zu bekämpfen. Der erste Satellit war Sputnik 1. Die damalige Sowjetunion schickte ihn am 4. Oktober 1957 in den Erdorbit. Sogleich wurde das Objekt von Amateuren mit Kameras verfolgt; ähnlich erging es seinen Nachfolgern. Und bis zum Frühjahr 1959 hatte die Defense Advanced Research Projects Agency der USA bereits ein Satellitenüberwachungsnetz aufgebaut. Es folgte die erste US-amerikanische Anti-Satelliten-Waffe, eine Rakete namens High Virgo, die im September 1959 erstmals zu Testzwecken startete. Die UdSSR zog nach: 1963 schickte das Land eine Anti-Satelliten-Waffe auf eine Umlaufbahn eines defekten russischen Satelliten, manövrierte sie in seine Nähe und ließ sie dort explodieren.

Diese anfänglichen Machtdemonstrationen im Weltraum ebnten jedoch rasch wieder ab. Stattdessen richteten die USA und die Sowjetunion ihre Aufmerksamkeit während des Kalten Kriegs vorrangig auf das Gleichgewicht der Atomwaffen. Zwar bauten die USA auch in den folgenden Jahrzehnten fleißig Satelliten, »die zu vielem fähig waren, sehr zuverlässig funktionierten und Milliarden von Dollar kosteten«, sagt Brian Weeden von der Secure World Foundation, einer privaten Stiftung, die sich unter anderem für die friedliche Nutzung des Weltraums einsetzt. »Aber die Satelliten wurden nicht mit der Intention gebaut, dass diese einen Feind bekämpfen müssen.« Und als die UdSSR im Jahr 1991 schließlich auseinanderbrach, nahm Amerika wohl an, es würde den Weltraum für immer dominieren, vermutet Weeden.

2001 tauchte das Thema Weltraumkrieg dann kurz auf der Agenda der USA auf, als der neue Verteidigungsminister, Donald Rumsfeld, einen Bericht vorlegte, der vor der

Satelliten im Weltraum

Die Orbitalkorridore um unseren Planeten sind inzwischen voll mit großen und kleinen Satelliten. Die Flugkörper übertragen Informationen, machen Bilder von der Erde, versorgen Wissenschaftler mit Daten, liefern Rundfunk, GPS, Wettervorhersagen und stellen viele andere Aspekte des modernen Lebens sicher. Auf einem befinden sich sogar Menschen. In der Tabelle sind alle bekannten aktiven Satelliten gelistet sowie Informationen über ihre Zugehörigkeit, Aufgabe und Position.

Regionen

Nur sechs Länder oder Regionen kontrollieren den Großteil der Satelliten im Orbit, wobei die USA den größten Anteil besitzen: 1604 der hier gezeigten 2956 Satelliten sind US-amerikanische.

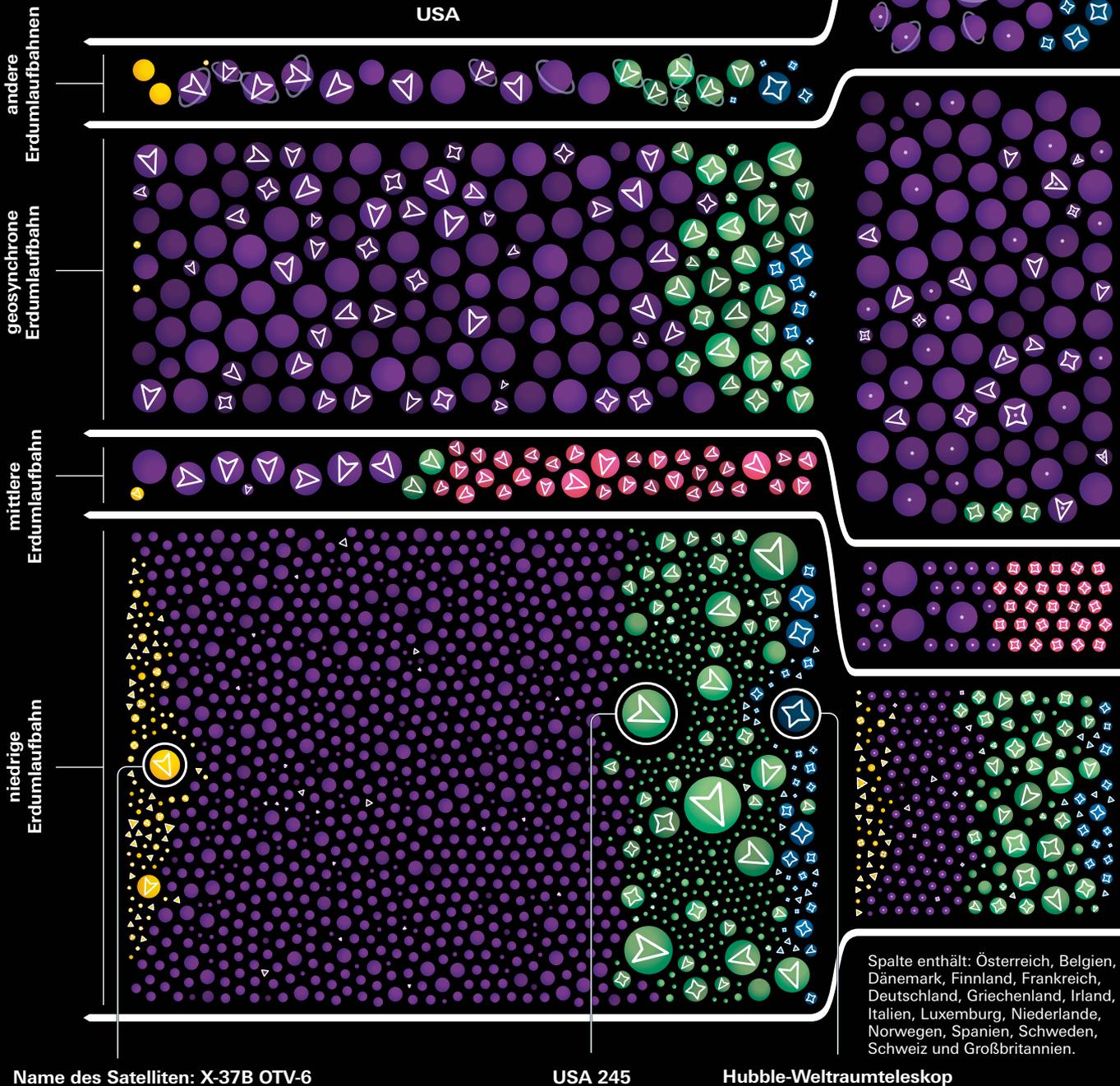
Das Diagramm richtig lesen

Jeder der 2956 Punkte steht für einen aktiven Satelliten, geordnet nach Kontrollregion (Spalten) und Orbitalbereich (Zeilen) wie in Jonathan C. McDowell's General-Katalog der künstlichen Weltraumobjekte gelistet (Stand 1. September 2020).

Punktgröße repräsentiert die Masse eines Satelliten:

- 100 kg
- 1000 kg
- 5000 kg

Westeuropa
(Großbritannien mit weißem Punkt)



Spalte enthält: Österreich, Belgien, Dänemark, Finnland, Frankreich, Deutschland, Griechenland, Irland, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Spanien, Schweden, Schweiz und Großbritannien.

Klasse und Kategorie

Satelliten gehören entweder der Regierung, dem Militär, der Privatindustrie, akademischen Forschungsinstituten oder Einzelpersonen. Innerhalb jeder dieser »Klassen« haben die Satelliten unterschiedliche Funktionen inne, hier bezeichnet durch »Kategorie«.

Farbe steht für die Kategorie:

- Test und Training
- Kommunikation
- Bildung, Überwachung und Meteorologie
- Navigation
- Forschung

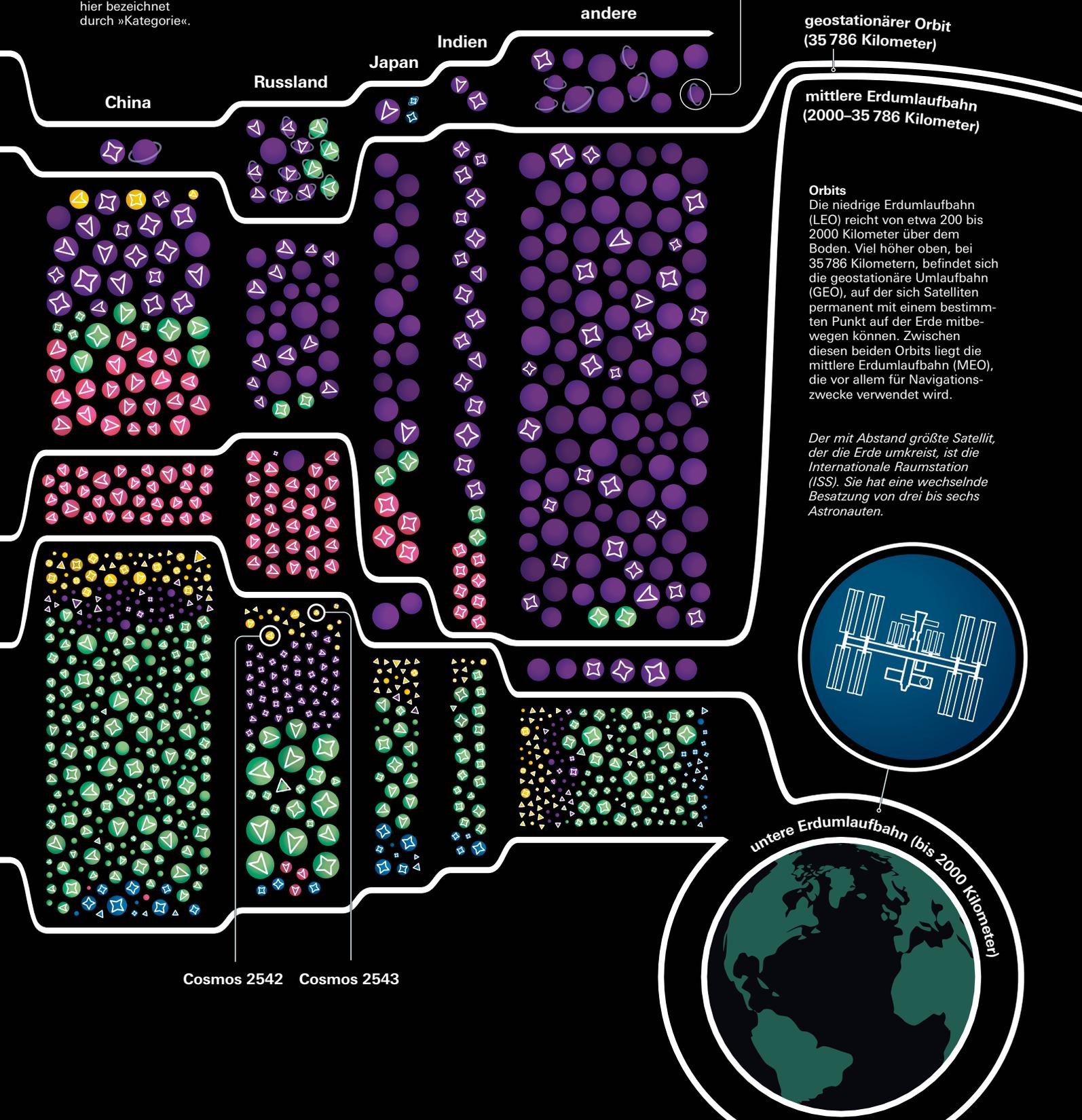
Symbol steht für Klasse:

- kommerziell
- ☆ zivil
- △ akademisch/Amateur
- ◀ Verteidigung

Schattierung zeigt Startdatum:

- 15. Nov. 1974
- ↓
- 31. Aug. 2020

Hochelliptische Umlaufbahnen (HEO) sind Bahnen um die Erde mit hoher Exzentrizität, die es Satelliten ermöglichen, die meiste Zeit in einer einzigen Hemisphäre zu verweilen.



geostationärer Orbit
(35 786 Kilometer)

mittlere Erdumlaufbahn
(2000–35 786 Kilometer)

Orbits

Die niedrige Erdumlaufbahn (LEO) reicht von etwa 200 bis 2000 Kilometer über dem Boden. Viel höher oben, bei 35 786 Kilometern, befindet sich die geostationäre Umlaufbahn (GEO), auf der sich Satelliten permanent mit einem bestimmten Punkt auf der Erde mitbewegen können. Zwischen diesen beiden Orbits liegt die mittlere Erdumlaufbahn (MEO), die vor allem für Navigationszwecke verwendet wird.

Der mit Abstand größte Satellit, der die Erde umkreist, ist die Internationale Raumstation (ISS). Sie hat eine wechselnde Besatzung von drei bis sechs Astronauten.

untere Erdumlaufbahn (bis 2000 Kilometer)

Cosmos 2542 Cosmos 2543

Verwundbarkeit der USA im Weltall warnte. Mit »A Space Pearl Harbor« wurde darin auf den Überraschungsangriff der Japaner auf den US-Flottenstützpunkt Pearl Harbor vor Hawaii im Jahr 1941 angespielt. Der Tenor: So etwas dürfe sich im All nicht wiederholen. Im Anschluss begann sich Douglas Loverro, ehemaliger Leiter verschiedener militärischer und ziviler US-amerikanischer Raumfahrtprogramme, für eine Art Weltraumstreitkraft einzusetzen. »Aber dann ereignete sich 9/11, und alle vergaßen den Weltraum«, erinnert sich Loverro.

In der Zwischenzeit hatten auch Frankreich, Japan, Großbritannien und Indien ihre eigenen Satelliten gestartet. Hinzu kamen viele weitere Nationen, die solche Geräte mit Hilfe anderer Länder gefertigt und ins All befördert hatten, darunter Deutschland. Loverro und seine Kollegen sowie Abgeordnete des Repräsentantenhauses drängten weiterhin auf die Einführung einer Weltraumsparte des Militärs – lange ohne Erfolg. Doch im Februar 2019 ordnete der amerikanische Präsident Donald Trump plötzlich per Dekret an, eine »Space Force« einzurichten. »Auf magische Weise wurden wir wiederbelebt«, sagt Loverro.

Ende 2019 wurde eine militärische Abteilung für den Weltraum dann offiziell gegründet. Zunächst ging es jedoch eher um bloße Rhetorik als um handfeste Details. Etliche abfällige Bemerkungen in sozialen Netzwerken waren die Folge. Das Image der Abteilung wurde nicht besser, als ihre erste offizielle Handlung darin bestand, Tarnuniformen für ihre Soldaten zu präsentieren, deren »Schlachtfeld« ein Büro ist. Das Logo, das unübersehbare Ähnlichkeiten mit dem Abzeichen der Sternenflotte in der Fernsehserie »Star Trek« aufwies, tat sein Übriges. Ab Juni 2020 wurde die Sache dann ernster. Die Verantwortlichen begannen damit, Experten zu rekrutieren, sich mit internationalen Verbündeten zu koordinieren und Kriegsszenarien am Computer zu simulieren.

Große Bandbreite an orbitalen Waffen

Mittlerweile können Militärs aus einem umfangreichen Sortiment an Anti-Satelliten-Waffen, kurz ASAT-Waffen, auswählen. Die schlagkräftigste Option ist eine Lenkrakete, die von der Erde aus abgefeuert wird. Die USA und Russland besitzen solche ASAT-Raketen seit dem Kalten Krieg. Inzwischen haben auch China und Indien zu Testzwecken derartige Lenkflugkörper auf ihre eigenen Satelliten geschossen. Der jüngste Versuch fand im April 2020 in Russland statt.

Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz manövrierfähiger Satelliten wie Cosmos 2542. Herkömmliche Satelliten lassen sich in der Regel nicht beliebig lenken, da sie unter anderem aus Gewichtsgründen nur kleine Antriebe haben. Solche, die Aufgaben wie Auftanken oder Reparaturen übernehmen, müssen allerdings voll manövrierfähig sein. Sie könnten dann genauso dazu dienen, andere Satelliten auszuspionieren oder sie sogar abzuschießen.

In den letzten Jahren haben die USA und Russland zudem Satelliten eingesetzt, die kleinere Subsatelliten in Umlaufbahnen einbringen können: Cosmos 2542 setzte etwa Cosmos 2543 aus, der dann ebenfalls USA 245 verfolgte. Die Amerikaner wiederum haben mit X-37b eine

Alle Welt im Orbit

Heutzutage betreiben fast 100 Nationen Satelliten im Orbit, sogar der Zwergstaat Monaco oder der Inselstaat Tonga. Gleichwohl haben nur zwölf Länder sowie die Europäische Weltraumorganisation ESA Satelliten mit eigenen, selbst entwickelten Trägerraketen gestartet: USA, Russland (beziehungsweise Sowjetunion), Frankreich, Japan, China, Großbritannien, Indien, Ukraine, Israel, Iran und Nordkorea. Deutschland ist für die Entsendung in den Orbit weiterhin auf andere Staaten angewiesen und besitzt vergleichsweise wenige eigene Satelliten. Das liegt unter anderem daran, dass ein Großteil der deutschen Mittel für die Raumfahrt nicht in nationale, sondern in europäische oder internationale Projekte fließt. Auch die Bundeswehr sah lange nicht die Notwendigkeit nationaler Systeme. Einige Nationen wie Brasilien, Argentinien und Taiwan befinden sich in verschiedenen Stadien der Entwicklung ihrer eigenen Trägerraketen, um damit Satelliten in den Orbit zu befördern. Ähnliche Ziele verfolgen mittlerweile auch etliche private Raumfahrtunternehmen (in verschiedenen Ländern).

kompaktere, robotergestützte Version des Spaceshuttles, das ebenfalls kleinere Flugkörper aussenden kann.

Daneben gibt es Weltraumkriegstechnologien, die man nicht sehen kann: elektromagnetische Strahlung etwa. Auf Satelliten können entsprechende Geräte installiert sein, mit denen sich die Kommunikation mit Bodenstationen stören lässt. Die Strahlung erlaubt so genannte Spoofing-Angriffe, in deren Folge attackierte Satelliten fehlerhafte Informationen senden. Es ist ein offenes Geheimnis, dass die USA, China und Russland routinemäßig die Verbindungen anderer Länder mit ihren jeweiligen Navigationssatelliten stören.

Auch am Boden oder auf Satelliten installierte Laser lassen sich als Waffe einsetzen. Ihr Licht kann die Fotosensoren der Spionagesatelliten derart blenden, dass sich damit nichts mehr erkennen lässt. Allerdings ist unklar, wer welche Lasertechnologie mit welchen Fähigkeiten besitzt.

Fest steht jedoch: Es gibt genügend Möglichkeiten für feindliche Aktivitäten im Weltraum – und die USA haben dort viel zu verlieren. Von den knapp 3000 Satelliten im Erdorbit gehören den USA rund die Hälfte – die exakten Zahlen ändern sich laufend und variieren manchmal abhängig von der Quelle. Bei etwa 1000 der US-amerikanischen Exemplare handelt es sich um kommerzielle Geräte; sie dienen zum Beispiel dem Rundfunk oder der Kommunikation. Rund 200 Stück sind von der Regierung oder von Forschungseinrichtungen. Sie sammeln unter anderem Daten für die Vorhersage von Wirbelstürmen, beobachten die Kontinentaldrift oder erforschen das Universum, wie das Hubble-Weltraumteleskop. Die restlichen, mehr als 200,

unterhalten das Militär und der Geheimdienst. Sie werden zur Spionage und für Kommunikationszwecke genutzt, etwa um Streitkräfte zu kommandieren oder Drohnen zu steuern.

Ein paar dieser Militär- und Aufklärungssatelliten sind fundamental für die Sicherheit der USA. Das Raketenfrühwarnsystem nutzt lediglich acht Satelliten, das hochauflösende Bildmaterial für die Geheimdienste wird von vielleicht einem Dutzend erstellt, und die militärische Kommunikation hängt von nur sechs ab. Es handelt sich also um leicht verwundbare Systeme.

Doch bislang weiß niemand, wie man Satelliten effektiv verteidigen kann. Beobachtungssatelliten lassen sich womöglich mit Verschlussblenden ausstatten, die auf zu viel Blendlicht reagieren. Bodyguard-Satelliten wiederum könnten andere, wichtige Satelliten vor Angriffen schützen. Ob solche Verteidigungsstrategien bereits in die Praxis umgesetzt worden sind, ist unbekannt. »Man wird kaum offizielle Details über die Verteidigungstechniken finden«, sagt Weeden. Solche Informationen blieben stets unter Verschluss.

Laut Weeden ist die Tarnung eines Satelliten technisch möglich – aber auch teuer und schwierig. Außerdem lässt sich ein Raumflugkörper zwar unsichtbar für Radar oder für Teleskope machen, jedoch nicht für beide gleichzeitig. Darüber hinaus kann die dazu notwendige Technik die Leistung des Satelliten beeinträchtigen. Die meisten Verteidigungsbemühungen konzentrieren sich daher auf Abschreckung. »Und das Mittel, zu dem das Militär hier standardmäßig greift, heißt Drohung«, erzählt Grego. »Ihr setzt ASAT-Waffen gegen mich ein, also werde ich sie gegen euch einsetzen.« Eine solche Situation könnte rasch eskalieren.

Die US-Amerikaner sorgen sich in diesem Kontext besonders wegen ihrer spezifischen Verwundbarkeit. Denn Russland und China sind schlichtweg nicht so sehr auf ihre Militärsatelliten angewiesen. »Es sind eben nur die USA, die militärische Operationen überall auf der Welt durchführen«, sagt Weeden. Russlands und Chinas Kommunikation zu Verteidigungszwecken ist eher lokal oder regional begrenzt. Aus diesem Grund können die beiden Länder einen Ausfall ihrer Satelliten im Allgemeinen gut kompensieren, glaubt der Experte für Weltraumpolitik.

In US-Kreisen sucht man daher nach Möglichkeiten, Angriffen auf die eigenen Flugkörper vorzubeugen. Ein probates Mittel wären redundante, widerstandsfähige Systeme, die Verluste hinnehmen können, ohne an Effektivität zu verlieren. Ein solches Ziel wäre für die gegnerische Partei nicht attraktiv – eine Standardtaktik der militärischen

Abschreckung. Gleichwohl ist nicht klar, ob das Pentagon diesen Ansatz praktiziert. Zwar wurde seine offizielle »Abwehrstrategie für den Weltraum« im Juni 2020 veröffentlicht, jedoch ohne interessante Details zu nennen.

Traditionell schließt das Pentagon zum Bau seiner Satelliten Verträge mit Giganten der Rüstungsindustrie wie Lockheed Martin, Raytheon und Northrop Grumman. In der Regel sind die Raumfahrzeuge so groß wie wuchtige Pickup-Trucks. Ein Grund dafür sei wirtschaftliche Effizienz, sagt Oberst Eric Felt vom Air Force Research Laboratory's Space Vehicles Directorate. »Welche Funktion man auch benötigt, man packt es einfach obendrauf«, erklärt er das Motto. Ganz egal, was man gerade fertige.

Private Raumfahrtunternehmen setzen neue Maßstäbe

Die so genannten New-Space-Unternehmen, darunter SpaceX, Blue Origin oder Virgin Galactic, beweisen allerdings seit geraumer Zeit, dass Wirtschaftlichkeit anders aussehen kann. Sie konstruieren wiederverwendbare Trägerraketen und Satelliten so klein wie Wassermelonen, die nur ein Viertel, mitunter nur ein Zehntel von sonst üblichen Versionen kosten. Auch Felt denkt, dass das Militär mit dieser Strategie mehr Satelliten starten könnte. Zusätzlich verteilen sich damit die verschiedenen Funktionen auf unterschiedliche Satelliten. Das erleichtert den Austausch im Fall eines Schadens. SpaceX verknüpft sogar Tausende von kleinen Satelliten zu großen Konstellationen, die etwa einen weltweiten Internetzugang gewährleisten. Solche Systeme sind äußerst robust gegenüber Angriffen.

Dagegen ist das weltraumgestützte Infrarot-Raketenfrühwarnsystem des US-Militärs, kurz SBIRS, eine Konstellation aus bloß zehn großen Satelliten – und damit »ein fettes, saftiges Ziel«, sagt Joshua Huminski vom National Security Institute der George Mason University. »Wenn man drei SBIRS-Satelliten trifft, ist das Frühwarnsystem ausgeschaltet.« Wäre SBIRS stattdessen eine Konstellation vieler Kleinsatelliten, wäre der Ausfall von dreien zwar ärgerlich, aber das System würde weiterhin funktionieren, so Felt.

Er berichtet, dass die Space Force derzeit enge Beziehungen zu New-Space-Unternehmen aufbaue. In Zuge dessen würde es auch deren Regeln für Bestellungen neuer Techniken übernehmen: nach Funktion und nicht mehr nach Spezifikation. Das bedeutet so viel wie: »Ich brauche ein System, das mir ausreichend Koffein zuführt« und nicht mehr »Ich brauche eine große Tasse Kaffee«.

Mitte Juli 2020, vier Monate nach dem Ende der mutmaßlichen Verfolgungsjagd im All, stellten Amateurbeobachter fest, dass der Subsatellit Cosmos 2543 plötzlich von einem Projektil begleitet wurde, getauft Objekt 45915. Es entfernte sich dann aber wieder mit mehr als 1100 Kilometern pro Stunde – offensichtlich besaß es also einen eigenen Antrieb. John Raymond nannte den Vorfall einen »Orbitwaffentest«. Das britische Verteidigungsministerium twitterte, es hoffe, dass Russland künftig zusammen mit internationalen Partnern auf verantwortliche Verhaltensregeln im Weltraum hinarbeiten werde.

Denn bestehende international verbindliche Verträge sind unspezifisch, alt oder auf unbestimmte Zeit auf Eis

Die USA sind maßgeblich von ihren Satelliten abhängig – und damit sehr verwundbar

gelegt. Der offizielle Weltraumvertrag, der den Einsatz nuklearer Waffen im Weltraum verbietet, wurde etwa schon 1967 unterzeichnet. Seitdem hat sich die Raumfahrttechnik enorm weiterentwickelt. Im Jahr 2014 schlugen Russland und China eine Abmachung vor, welche die Stationierung von Waffen im Weltraum verbietet. Aber am Ende stimmten die US-Amerikaner weder den Bedingungen des Vorschlags zu noch unterbreiteten sie einen Gegenvorschlag.

Erst kürzlich einigte sich das Komitee der Vereinten Nationen für die friedliche Nutzung des Weltraums auf 21 nicht bindende Richtlinien für das Verhalten im Weltall. Dazu seien nationale Regulierungsrahmen für Weltraumaktivitäten überarbeitet worden, berichtet Grego. Das Ergebnis ist allerdings eher vage und für die Astrophysikerin unbefriedigend: »Wenn man die Vereinbarung liest, wird man enttäuscht.« Sie hatte gehofft, dass sich die Richtlinien mit potenziellen Weltraumkriegen befassen würden, was allerdings nicht der Fall ist.

Zweifelsohne sind die Fragen, die beantwortet werden müssten, komplex und zum Teil unbequem. Wie bezieht man alle Beteiligten mit ein? Nicht nur die drei »Platzhirsche« USA, China und Russland, sondern alle Nationen, die im Weltraum zugange sind? Wie könnte eine sinnvolle Definition von orbitalen Waffen lauten? Ein Roboterarm kann einen defekten Sensor ersetzen, aber auch den Satelliten eines anderen Lands kapern. Wie richtet man geeignete Kommunikationskanäle ein, so dass beispielsweise die Nachricht über eine unbeabsichtigte Kollision im Orbit den Adressaten erreicht, bevor es zur Eskalation kommt?

Was gilt überhaupt als Aggression? Ein klarer Fall wäre natürlich, wenn eine Nation einen Satelliten eines anderen Lands mit einer ASAT-Rakete abschießt. Doch ist es schon zu viel, wenn sich ein Satellit dem einer anderen Nation nähert, so wie beim eingangs beschriebenen Vorfall? Wie nah wäre noch in Ordnung? Wie lässt sich sicherstellen, dass Regeln eingehalten werden? Und welche Angriffsziele würden die rote Linie für einen Krieg überschreiten? All solchen Fragen müsse man sich stellen, sagt John Klein, Ausbilder am Space Policy Institute der George Washington University. »Wenn man alle GPS-Satelliten eines Lands attackiert, zerstört man eine kritische Infrastruktur. Das bedeutet dann wahrscheinlich Krieg«, denkt Klein. »Aber was, wenn man nur einen einzelnen kleinen Satelliten ausschaltet?«

Unterdessen weist Grego darauf hin, dass sich die Länder schon mehr oder weniger an inoffizielle Verhaltensregeln halten. Sie registrieren neue Satelliten, die sie in den Orbit schicken. Sie entfernen ausgediente Satelliten aus ihrer Umlaufbahn, um Trümmer und somit Unfälle zu vermeiden. Sie testen so gut wie keine ASAT-Waffen und zerstörten bislang keine Satelliten eines anderen Lands. Wenn also kein verbindlicher Vertrag zu Stande kommt, wie wäre es wenigstens mit einem nicht bindenden internationalen Abkommen auf der Grundlage des derzeitigen Verhaltens? Die USA und Russland sprächen über so etwas, sagt John Lauder. »Nicht, dass wir Details kennen. Aber sie reden – und das ist gut.«

Auch Grego fände es am besten, gegenwärtige Normen als Ausgangspunkt für Gespräche zu nehmen. Doch die

Es gibt 21 nicht bindende Richtlinien für das Verhalten im All. Ob sie einen Krieg verhindern können, ist fraglich

Trägheit der Diplomatie zermürbt sie: Die Situation hätte bereits vor Jahren durch allgemeine Beschränkungen geregelt werden sollen, findet die Forscherin.

Eric Desautels, Direktor des Office of Emerging Security Challenges des Außenministeriums, einer Abteilung, die sich mit neuen Herausforderungen der nationalen Sicherheit beschäftigt, berichtet, man würde sich darum kümmern. Im Juli 2020 diskutierten etwa US-amerikanische und russische Beamte über die Öffnung bestimmter Kommunikationswege, um Missverständnisse und Eskalationen zu vermeiden. Das waren die ersten derartigen Gespräche seit 2013. Beide Parteien äußerten Interesse an deren Fortsetzung. Währenddessen unterstützen die USA ein neues UNO-Abkommen, welches das Risiko für sich aufschaukelnde Aggressionen verringern soll.

Globales Netzwerk an Sensoren verfolgt Objekte im Orbit

Das Fundament für die Sicherheit im Weltraum ist die Kenntnis des Aufenthaltsorts und Verhaltens jedes einzelnen Satelliten. Die Weltraumdoktrin der Space Force von Juni 2020 spricht hier von »space domain awareness«. Dieses »Bewusstsein« wird gespeist aus einem weltweiten Netzwerk von Sensoren auf Satelliten sowie von Teleskopen am Boden, die permanent den gesamten Erdorbit beobachten und jedes Objekt verfolgen, das größer ist als zehn Zentimeter: knapp 3000 Live-Satelliten sowie 24000 nicht funktionierende »Zombiesatelliten« und Weltraumtrümmer.

All jene Informationen werden an eine Einheit für Raumfahrtkontrolle der Space Force am Luftwaffenstützpunkt Vandenberg in Kalifornien geschickt, das 18th Space Control Squadron. Mitarbeiter sortieren die Daten über geheime Satelliten aus, der Rest wandert in einen frei zugänglichen Online-Katalog namens »Space-Track«. Wenn zwei Satelliten sich zu nahe kommen, wird eine Warnung abgegeben.

Die 18. Weltraumkontrollstaffel sitzt in einem geheimen Operationszentrum, das – Fotos von Pressemitteilungen nach zu urteilen – Funktionalität über Gemütlichkeit stellt: miteinander verschaltete Rechner, Schreibtische, die Wände gepflastert mit Monitoren. In dieser modernen Bürohalle arbeiten immer einige Mitglieder der Einheit und, um vollständige und exakte Analysen zu gewährleisten, Kollegen aus dem Vereinigten Königreich, Australien, Kanada, der NASA und des Handelsministeriums sowie ein Vertreter aus einem Kollektiv von privaten New-Space-Unternehmen.

Nicht im selben Stockwerk, aber stets für Rücksprachen verfügbar, findet man Vertreter aus Frankreich, Deutschland und des US-Geheimdienstes, einschließlich des amerikanischen Geheimdienstes sowie Verteidigungsministeriums. Die meisten Soldaten in der 18. Staffel sind jünger als 25 Jahre. Und offenbar sind alle technisch sehr versiert: »Die haben mich aus den Socken gehauen«, berichtet der Befehlshaber der Einheit, Oberstleutnant Justin Sorice. Mehr ist von ihm allerdings nicht über die Arbeit seiner Abteilung zu erfahren.

Um herauszufinden, wie man einen Satelliten verfolgt, muss man stattdessen die Amateure befragen – die Hobbybeobachter, wie sie lieber genannt werden möchten. Es gibt bis zu 100 aktive; viele sind Rentner, und alle sind technikbegeistert. Sie benutzen Ferngläser und Stoppuhren oder Radioempfänger, mitunter auch aufwändigere Technik – und liefern Daten über Satelliten mit einer weltweiten Abdeckung, da sie in ganz unterschiedlichen Teilen der Erde sitzen. Manchmal kommunizieren sie über Twitter, meistens verwenden sie aber eine öffentliche E-Mail-Liste namens SeeSat. Dort hat Grego ihr Treiben bereits vor Twitter verfolgt. »Ich habe schon lange aufgehört, sie Amateure zu nennen«, sagt die Forscherin und verweist auf die mitunter beeindruckenden Fähigkeiten der Beobachter.

Mit ihrem Low-Tech-Ansatz können sie hauptsächlich die hellsten, größten Satelliten verfolgen. Ihre Zielobjekte finden sie auf Space-Track, auf Internetseiten, die Satelliten und deren Routen auflisten, oder in Hinweisen für Raketenstarts, bei denen bestimmte Regionen und Zeitfenster wegen Kollisionsgefahr gemieden werden müssen.

Die Hobbybeobachter warten, bis der auserwählte Satellit an einem Stern vorbeifliegt, und stoppen anschließend die Zeit, bis er einen weiteren passiert. Aus der Position der beiden Himmelskörper und der bis auf einen Bruchteil einer Sekunde bestimmten Flugdauer können sie die Umlaufbahn des Satelliten ableiten. Beim letzten Flug des geheimen Spionagesatelliten X-37B hatten die Mitwirkenden diese Information innerhalb von 24 Stunden.

»Die Umlaufbahn liefert eine überraschende Vielfalt an Informationen«, erklärt Jonathan McDowell, ein Hobbybeobachter und Astronom am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Viele Satelliten befinden sich zum Beispiel in einer niedrigen Erdumlaufbahn (»low earth orbit«, LEO), in einer Höhe von maximal 2000 Kilometern. Von dort lässt sich zwar nur ein kleines Gebiet betrachten, dafür aber in vergleichsweise hoher Auflösung. Daher nehmen LEO-Satelliten meistens Fotos auf, entweder für die Wissenschaft – beispielsweise zur Wetterbeobachtung – oder eben für Spionagezwecke.

Satelliten hingegen, die exakt in 35786 Kilometer Höhe in geostationärer Umlaufbahn (GEO) schweben, bewegen sich genau mit einem Punkt auf der Erdoberfläche mit. Solche GEO-Satelliten sind meist für Kommunikation oder Rundfunk zuständig. Andere Exemplare wiederum, die hoch auf elliptischen Umlaufbahnen kreisen, verbringen die meiste Zeit über der nördlichen Hemisphäre. In der Regel handelt es sich dabei um Frühwarn- oder Spionagesatelliten. Flugkörper auf sonnensynchronen Orbits bewegen sich im Gleichschritt mit der Sonne, so dass sich ihr Schatten

auf der Erde nie verändert: eine gute Voraussetzung für Spionage.

Weitere Informationen lassen sich aus dem Verhalten eines Satelliten ableiten. Wenn einer seine Umlaufbahn anpasst, kann das verschiedene Gründe haben. Vielleicht will man nur den Luftwiderstand verringern oder aber einen ganz bestimmten Flecken Erde beobachten: »Während des Kriegs von 1973«, sagt McDowell, Bezug nehmend auf den Jom-Kippur-Krieg zwischen Israel und einer Koalition der arabischen Staaten, »veränderten Satelliten ihre Bahnen, um häufiger über Ägypten zu fliegen.« Auch aus den Sonnenstrahlen, die von den glatten Oberflächen der Satelliten

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



NASA / STS-130 CREW MEMBER

reflektiert werden, lassen sich Rückschlüsse ziehen. Sind die Spiegelungen zum Beispiel unregelmäßig, verlässt der Satellit wahrscheinlich gerade seine Umlaufbahn.

McDowell glaubt, dass etwa zehn Prozent der von ihm und seinen Mitstreitern beobachteten Satelliten der militärischen Kommunikation, der Frühwarnung oder der Spionage dienen. Ihnen gemeinsam ist, dass sie nicht in Space-Track auftauchen. Die hobbymäßig durchgeführten Beobachtungen liefern also nicht nur frei zugängliche Informationen über zivile Satelliten aller Länder, sondern sind zudem eine Hauptdatenquelle für Militär- und Geheimdienstobjekte.

Seine Mitstreiter und er seien sich der großen Verantwortung bewusst, wenn sie die Öffentlichkeit etwa über die Aktivitäten von Spionagesatelliten informieren, so McDowell. Im Großen und Ganzen würden sie sich jedoch keine Sorgen machen, dass sie nationale Geheimnisse aufdecken könnten. Auch rivalisierende Nationen hätten die Möglichkeit, sich Ferngläser und Stoppuhren zu kaufen, scherzt McDowell. Er hält die Hobbybeobachter insgesamt für eher unpolitisch. Ihre Feinde seien nicht andere Länder, sondern ausfallende und fehleranfällige Geräte. »Wir sehen uns als eine internationale Community von Ingenieuren im Weltraum, die gegen »Murphy's Law« und die Natur kämpfen«, sagt McDowell. Und sie würden gern Rätsel knacken, in diesem Fall Lücken in den Daten von Space-Track finden und diese füllen. »Es ist gewissermaßen wie Sudoku«, scherzt er.

Letztlich ist es allerdings viel mehr als das, gewährleistet ihre Arbeit doch eine unabhängige Kontrolle und Transparenz. Hätten die Amateure das Stalking von USA 245 nicht veröffentlicht, hätten die USA ihre Verwundbarkeit nicht zugeben müssen und Russland hätte alles leugnen können, meint Grego. Das Militär und die Diplomaten werden auch weiterhin im Geheimen operieren. Aber wenn ein Weltraumkrieg droht, dürften die Hobbybeobachter die entsprechenden Informationen zugänglich machen. ◀

INTERVIEW

»SCHLAGABTAUSCH IN MASCHINEN- GESCHWINDIGKEIT«

Weltweit arbeiten Militärmächte an autonomen Waffensystemen, die die Kriegsführung revolutionieren könnten. Der Technikfolgenforscher Reinhard Grünwald warnt vor einer beispiellosen Eskalation auf dem Schlachtfeld.

► spektrum.de/artikel/1823132



UNTER BEOBACHTUNG Meist sitzt bei Drohnen wie dem Global Hawk noch ein Mensch am Joystick. Doch in manchen Situationen agieren die Fluggeräte bereits autonom.

Spektrum: Herr Dr. Grünwald, Sie haben im Auftrag des Bundestags eine umfassende Studie zu autonomen Waffensystemen erstellt. Sie schreiben darin, dass der Kriegsführung ein Paradigmenwechsel bevorstehen könnte. Wie kommen Sie darauf?

Grünwald: Einer der Anlässe für unseren Bericht war die Drohnenthematik, die sich derzeit rasant entwickelt. Vor zehn Jahren hatten nur die USA solche Geräte, heute sind es etwa 30 Staaten. Die Drohnen werden zwar noch von Piloten, die in einer Militäranlage sitzen und auf Videobilder reagieren, per Joystick gesteuert. Aber die Fluggeräte sind bereits teilweise automatisiert: Der Global Hawk der USA kann zum Beispiel selbstständig starten und landen, Zielkoordinaten ansteuern und sogar feindliche Radaranlagen umfliegen. Man kann darin also den Vorläufer eines autonomen Waffensystems sehen, das gänzlich ohne Rücksprache mit einem Menschen agiert.

Ab wann wird aus einem automatisierten System ein autonomes?

Über diese Frage haben wir uns beim Schreiben des Berichts lange den Kopf zerbrochen. Letzten Endes gibt es hier keine scharfe Definition, die alle akzeptieren. Je nachdem, was ein System kann, was es macht und in welchen Einsatzszenarien es unterwegs ist, gibt es unterschiedliche Meinungen. Das macht es auch sprachlich schwierig und führt zu Missverständnissen.

Können Sie ein Beispiel nennen?

Die eine Person meint mit einer autonomen Waffe vielleicht einen futuristischen Roboter, der über das Schlachtfeld läuft und nach eigenem Gusto herumschießt. Und der andere denkt an ein Flugabwehrsystem wie MANTIS, das die Bundeswehr seit Jahren einsetzt und das selbstständig feindliche Geschosse anvisieren und abwehren kann. Letzteres ist eindeutig eine autonome Fähigkeit, aber schon noch etwas anderes als der Terminator aus den gleichnamigen Sciencefiction-Filmen.

Wie lassen sich derartige Missverständnisse vermeiden?

Es hilft, die Systeme nicht als Ganzes zu betrachten und sie mit dem Label »autonom« zu versehen, sondern genau zu benennen, welche Teile ohne menschliche Steuerung auskommen. Autonomie gibt es heutzutage ja in fast jeder Software. Denken Sie nur mal an die Werbung im Internet, die letztlich ein Algorithmus für Sie auswählt. Die entscheidende Frage ist, welche Funktionen noch der Kontrolle des Menschen unterliegen, und wie viel dabei jeweils auf dem Spiel steht. Waffensysteme sind hier ein

Dr. Reinhard Grünwald

ist seit über 20 Jahren wissenschaftlicher Mitarbeiter am Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Er hat 1996 an der FU Berlin in physikalischer Chemie promoviert. Seine Arbeitsschwerpunkte am TAB sind unter anderem die nachhaltige Energieversorgung und -nutzung sowie Chancen und Risiken von Schlüsseltechnologien. Seit vielen Jahren beschäftigt er sich mit dem Thema präventive Rüstungskontrolle etwa bei Weltraumwaffen oder bei unbemannten Systemen.



besonderer Fall, denn sie entscheiden im Zweifel über Leben und Tod.

Verstehe ich Sie richtig: Das ist bei heutigen Drohnen wie dem Global Hawk noch Zukunftsmusik?

Ja, für die großen Kampfdrohnen gilt das wohl. Hier sitzt, soweit wir wissen, immer noch ein Mensch am Abzug. Aber es gibt bereits kleinere Systeme, die vor einem Angriff keine Bestätigung mehr einholen. Ich denke hier vor allem an die israelischen Minidrohne Harpy, eine Art fliegende Streumunition, die es seit den 1990er Jahren gibt und die offenbar im Konflikt um Bergkarabach zum Einsatz kam. Sie ist mit Sprengstoff bestückt und wird in ein Gebiet geschickt, wo sie mit ihren Sensoren nach der Radarsignatur einer feindlichen Flugabwehranlage Ausschau hält. Entdeckt die Drohne diese, stürzt sie sich auf das Ziel und explodiert. Das passiert vollkommen automatisch.

Wie kommen Sie zu der Einschätzung, dass nicht auch große Kampfdrohnen schon solche Entscheidungen treffen?

Die Details dieser Systeme kennen natürlich nur die Leute, die damit arbeiten. Aber das US-Militär, das auf diesem Gebiet derzeit führend ist, ist hier relativ transparent. Aus öffentlichen Dokumenten bekommt man einen recht guten Eindruck des derzeitigen Technologiestands. Das alleine wäre vielleicht zu wenig, doch es gibt noch ein prinzipielles Argument, das gegen eine größere Autonomie heutiger Waffensysteme spricht.

Nämlich?

Armeen basieren auf Befehlsketten und Abläufen, die genau eingehalten werden müssen. Und in dieses Muster passen völlig autonom agierende Systeme derzeit einfach noch nicht. Man kann nur schwer vorhersagen, was sie in bestimmten Situationen tun werden. Nehmen Sie die Bilderkennung, in der künstliche Intelligenz heute bereits sehr gut ist. Selbst dabei treten immer wieder Fehler auf,

Experten für Zukunftstechnologien

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in der Frage, wie sich bestimmte Technologien auf Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt auswirken. Das TAB hat seinen Sitz in Berlin, ist aber Teil des Karlsruher Instituts für Technologie. Im Auftrag der Parlamentarier fertigen die Forscher Berichte zu gewünschten Themen an. Dafür recherchieren sie einerseits selbst, andererseits binden sie andere Wissenschaftler als Gutachter ein. Am Ende schreiben sie einen Bericht, der eine Informationsgrundlage für die Debatten in den Ausschüssen und dem Plenum des Bundestags bildet.

die keinem Kind unterlaufen würden, etwa wenn das Programm eine Wolke für einen Lkw hält. Das mag nicht oft passieren, aber für jeden Kommandeur ist das ein unkalkulierbares Risiko.

Dennoch arbeiten die großen Militärmächte weiter an autonomen Kampfsystemen.

Ja, denn letztlich brächten sie einen Zeitvorteil. In einer Gefechtssituation kann es auf Sekundenbruchteile ankommen, was natürlich auch Militärstrategen wissen. Das setzt selbst in westlichen Ländern eine Rüstungsspirale in Gang. Da heißt es dann: Wir möchten solche Systeme eigentlich nicht. Aber die anderen Staaten, die vielleicht nicht so sehr auf Ethik und Menschenrechte achten, arbeiten daran. Also müssen wir mitziehen.

Überzeugt Sie diese Argumentation?

Nein, ich halte das für eine hoch problematische Entwicklung. Setzen beide Kriegsparteien autonome Waffen ein, liefe es im schlimmsten Fall auf einen Schlagabtausch in Maschinengeschwindigkeit hinaus. Das wäre so ähnlich wie das High-Frequency-Trading an der Börse, bei dem Algorithmen binnen Millisekunden Aktien kaufen und verkaufen. In der Vergangenheit hat das wiederholt so genannte Flash Crashes ausgelöst. Dabei schaukeln sich automatisierte Befehle verschiedener Akteure auf absurde Weise hoch und lassen schließlich Aktienkurse abstürzen. Im Krieg will ich mir solch eine ungewollte Eskalation gar nicht erst vorstellen. Erst recht, wenn am Ende der Kette der Einsatz von Nuklearwaffen steht. Das ist alles schon sehr beunruhigend.

Können Sie sich keine Situation vorstellen, in der autonome Waffensysteme sinnvoll wären? Befürworter argumentieren, sie könnten in unvermeidbaren Konflikten Menschenleben retten. Wenn die Vereinten Nationen beispielsweise einem gewissen Warlord das Handwerk legen wollen, müssten sie weniger Soldaten entsenden.

Dieser Standpunkt hat durchaus prominente Unterstützer, etwa den US-Robotiker Ronald C. Arkin. Dahinter steht die Annahme, dass Maschinen irgendwann bessere Soldaten sein werden als Menschen und keine Kriegsverbrechen begehen. Schließlich agieren Maschinen streng rational und lassen sich nicht von Emotionen beeinflussen.

Sie klingen nicht so, als würden Sie den Standpunkt teilen.

Nein, ich neige eher zu der Auffassung, dass damit ein ethisches Problem bestehen bleibt: Man übergibt die Entscheidung über Leben und Tod an eine Maschine. Kein Soldat muss mehr sein Gewissen belasten und Verantwortung auf sich nehmen. Menschen werden zu Datenpunkten in einer Software. Aus Sicht vieler Beobachter steht das im klaren Konflikt zur Menschenwürde.

In Deutschland ist diese in besonderer Weise durch das Grundgesetz geschützt.

Ja, es gibt in einer ähnlichen Frage bereits ein Urteil des



AUTONOME BOMBE Wie ihr Vorgänger Harpy kann sich die zweieinhalb Meter lange Harop-Drohne auf einen Feind stürzen und am Ziel einen Sprengsatz zünden – angeblich vollautomatisch.

YON VALAT / BPA / PICTURE ALLIANCE

Bundesverfassungsgerichts aus dem Jahr 2006. Dabei ging es um das Szenario, dass Terroristen ein Passagierflugzeug entführen und es in einem Fußballstadion zum Absturz bringen wollen. Darf die Bundeswehr in einem derartigen Fall die Maschine abschießen, um so die Zuschauer im Stadion zu retten? Das Bundesverfassungsgericht hat das klar verneint: Man darf die gefährdeten Menschenleben nicht gegeneinander aufrechnen. Im Einzelfall mag ein Abschuss zwar gerechtfertigt sein. Aber man darf das nicht gesetzlich festschreiben. Die Verantwortlichen müssen in einer ethischen Ausnahmesituation immer wieder ihr Gewissen befragen. Und im Zweifel Schuld auf sich laden und juristisch dafür geradestehen.

Doch auch hier könnte man sagen: Eine gut programmierte und mit allen Informationen versorgte Maschine kann im Zweifel am besten entscheiden, wie sich der Schaden möglichst klein halten lässt. Das Problem dabei ist: Ethik lässt sich nicht immer in klare Regeln übersetzen, die dann auf jede Situation passen. Es bleiben am Schluss Dilemmata übrig, für die es keine einfache Lösung gibt. Das ist ja selbst beim autonomen Fahren schon so. Die mit diesem Feld beauftragte Ethikkommission hat hier sinngemäß gesagt: Das Auto darf keine Software enthalten, die im Zweifel lieber die Oma umfährt als das Schulkind.

Entsprechend müsste die deutsche Politik eigentlich entschieden dafür eintreten, autonome Waffensysteme zu ächten.

Ja, so steht es auch in den Koalitionsverträgen der beiden letzten Bundesregierungen. Im Detail ist die Sache aber keineswegs so klar, wie man denken würde. Was meinen die Parteien mit autonomen Waffensystemen? Und was

heißt ächten? Soll das eine juristisch oder völkerrechtlich bindende Vereinbarung werden? Oder einfach nur eine Willenserklärung? Und wenn es Regeln gibt: Wie genau sollen sie aussehen? All das ist noch Gegenstand des parlamentarischen Diskurses.

Und auf internationaler Ebene?

Gab es lange nur unregelmäßige Treffen bei den Vereinten Nationen in Genf. Seit 2017 entsenden die Staaten regelmäßig Experten zu den Verhandlungen. Die Hoffnung ist, autonome Waffensysteme im Rahmen der »Konvention über bestimmte konventionelle Waffen« zu regulieren. Sie schreibt beispielsweise vor, dass blind machende Laserwaffen in Kriegen verboten sind.

Wie laufen die Verhandlungen?

Es geht äußerst mühsam voran. Das Problem ist, dass Beschlüsse zu diesem Thema einstimmig von den Mitgliedsstaaten der UN getroffen werden müssen. Eine ambitionierte Kontrolle der Technologie oder gar ein Verbot ist daher nicht in Sicht. Denn es gibt Länder, die kein Interesse an einem beherzten Vorgehen zu haben scheinen.

Welche Staaten meinen Sie?

Die Initiative www.stopkillerrobots.org listet im Internet die Länder auf, die für ein Verbot oder eine starke Regulierung eintreten. Aktuell sind das nur 30 Nationen – fast ausschließlich Entwicklungs- und Schwellenländer – sowie das Europäische Parlament und die Organisation für Sicherheit und Zusammenarbeit in Europa (OSZE). Viele Länder mit eigener Waffenindustrie fehlen dagegen, von den USA über Russland bis hin zu den einzelnen europäischen Staaten, die größtenteils nicht noch mal separat unterschrieben haben.

Dafür steht China auf der Liste. Es fordert zwar öffentlich ein völkerrechtliches Verbot, aber es gibt Zweifel daran, ob sich das Land selbst daran halten würde. Jedenfalls steht in Ihrem Bericht, dass die Volksrepublik derzeit neben Israel und den USA zu den Hauptexporteuren von Kampfdrohnen zählt.

Ja, die großen Militärmächte möchten sich nicht einschränken lassen. Sie wollen offenbar lieber erst mal forschen und abwarten, wie sich die Technologie entwickelt.

Können Sie uns einen kurzen Einblick geben, über welche Fragen gestritten wird?

Es geht vor allem um das Ausmaß an Kontrolle, das der Mensch behalten sollte. Der Goldstandard ist hier die »meaningful human control«, zu Deutsch »bedeutsame menschliche Kontrolle«. Gemeint ist, dass stets ein Mensch aus eigener Überlegung mit eigenem Situationsverständnis die Entscheidung über das Abfeuern der Waffe treffen sollte – und sich im Zweifelsfall auch dafür verantworten muss. Ein Gegenbeispiel wäre das Szenario, bei dem jemand zwar am Ende einen Knopf drückt, aber womöglich nicht genügend Informationen für eine gut begründete Entscheidung hat. Er oder sie sieht dann vielleicht nur noch ein paar Pixel und den Computervorschlag »Angriff« auf einem Bildschirm, auf deren Basis man nicht mehr überblicken kann, ob der Einsatz der Waffe wirklich angemessen ist.

Wenn man es mit Maschinenethik ernst meint, sollte eigentlich klar sein, welches Konzept man bevorzugt ...

Schon, aber es gibt auch Vorschläge, die zwischen diese Pole fallen. Die USA plädieren zum Beispiel für »appropriate levels of human judgement«, also »angemessenes Niveau menschlicher Beurteilung«. Das wirft natürlich Fragen auf: Was heißt hier »angemessen«? Und wer entscheidet, was ein ausreichendes Maß an Beurteilung ist?

Wie ließen sich autonome Waffensysteme denn ganz praktisch regulieren? Das dürfte ja schwieriger sein als bei Atomwaffen, bei denen man einfach die Sprengköpfe zählen kann.

In der Tat. Die Autonomie, über die wir hier reden, basiert auf Software. Man erkennt bei einer Inspektion im Hangar nicht, ob eine Drohne nun autonome Funktionen hat oder nicht. Das ist auch ein Argument der Gegner einer Regulierung: Da ich nicht kontrollieren kann, ob sich andere Staaten an die Vereinbarung halten, bietet ein Vertrag keine Sicherheit.

Sehen Sie einen Ausweg? Laut Ihrem Bericht schließt sich das Fenster, auf diplomatischem Wege etwas zu erreichen, langsam, aber sicher.

Wenn es in Genf zu keiner Einigung kommt, müsste man wohl direkt bei der KI-Forschung ansetzen. Programmierer haben sich in der Vergangenheit wiederholt geweigert, an Software zu arbeiten, die auch in autonomen Waffensystemen zum Einsatz kommen könnten. Daneben muss die

Zivilgesellschaft in westlichen Ländern die Entwicklungen auf diesem Gebiet genau verfolgen und aufpassen, dass sie nicht in eine falsche Richtung laufen.

Was ist Ihre Prognose, wie sich die Technologie in den nächsten zehn Jahren weiterentwickeln wird?

Noch gibt es in Sachen Autonomie enorme technische Hürden zu überwinden, und diese sind größer, als man denken würde. Nehmen Sie wieder das Beispiel der Bilderkennung: Warum sind die Systeme darin bereits so gut? Weil Menschen mittlerweile gigantische Mengen an Bildern ins Internet hochgeladen haben, mit denen die großen Internetkonzerne ihre Software trainieren. Autonome Waffensysteme müssen mit ganz anderen Daten gefüttert werden, um zuverlässig zu funktionieren. Und diese Daten gibt es bisher nicht in der nötigen Menge und Qualität.

Das müssen Sie erklären.

Schauen Sie sich die autonomen Autos an: Das ist mittlerweile eine riesige Industrie, und man macht zweifellos Fortschritte. Aber anders als noch vor einigen Jahren vermutet, werden die Städte nicht schon in ein paar Jahren voller selbstfahrender Fahrzeuge sein. Ein Kriegseinsatz ist noch mal eine viel anspruchsvollere Situation als die Fortbewegung auf einer asphaltierten Straße mit verbindlichen Verkehrsregeln, an die sich die meisten halten. Von daher glaube ich, dass es noch sehr lange dauern wird, bis wir futuristische Systeme wie die eingangs erwähnten Kampfroboter à la Terminator sehen. Wenn es sie überhaupt eines Tages geben wird.

Was erwarten Sie stattdessen?

Zum einen eine größere Autonomie der bestehenden Systeme, also zum Beispiel eine immer bessere Raketenabwehr. Oder Drohnen, die im Schwarm agieren. Zum anderen neue Einsatzgebiete, etwa im Wasser. Dort ist vieles komplizierter als in der Luft, aber die technische Entwicklung schreitet rasch voran.

Am Ende steht das U-Boot mit Atomwaffen, das im Fall eines nuklearen Schlagabtauschs automatisch zurückschießt?

Man kann nur hoffen, dass niemand solche Ideen tatsächlich umsetzt. Ich rechne in den nächsten Jahren eher mit nichtbewaffneten Schiffen und U-Booten, die Daten sammeln. Womöglich als Teil eines größeren Systems vernetzter Geräte, in dem einige autonom agieren und andere noch von Menschen gesteuert werden. Das ist ein Trend, den wir heute schon sehen – und der sich auch von völkerrechtlichen Verträgen nicht aufhalten lassen wird: Digitalisierung und künstliche Intelligenz durchdringen alle Lebensbereiche. Und wir stehen nun eben vor der Aufgabe, dieser Entwicklung in besonders risikobehafteten Gebieten Grenzen zu setzen, um etwa einen Flash War zu verhindern. Wenn uns das gelingt, haben wir schon eine Menge erreicht.

Die Fragen stellte **Spektrum**-Redakteur Robert Gast.

Neues aus unserem Shop

Alle
Sonderhefte
auch im
PDF-Format



Wasserstoff: Blick ins Dunkle Zeitalter • Gammastrahlung: Jagd nach den außerirdischen Beschleunigern • Röntgenteleskope: Das All in neuem Licht • Neutronensterne: Der Radioblitzen des Magnetars • Protoplaneten: Bilder aus dem stellaren Kreißsaal • Kleinkörper: Besucher von den Sternen • € 8,90



Brennpunkt Covid-19 • Denguefieber: Impfstoff mit Tücken • Chronomedizin: Die innere Uhr bestimmt die Wirkung von Arzneien • Endometriose: Ein häufig verkanntes Leiden • Informatik: Auf der Jagd nach neuen Medikamenten • Pharmazie: Molekularer Jungbrunnen • € 8,90



Passiv-aggressiv: War doch keine Absicht! • Richtig scheitern: Aufstehen, Krone richten, weitergehen • Familie: Mama, Papa, ich will euch nie wiedersehen! • Meditations-Apps: Entspannungshelfer fürs Smartphone • € 5,90



Neolithikum: Wie die Bauern Europa eroberten • Christina von Schweden: Die radikalste Selbstbefreiung • Spanien: Massaker am Markttag • Sitting Bull: Sein Name selbst ist machtvoll • € 5,90

Hier bestellen:

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

GENTECHNIK DAS ERBGUT IN MITOCHONDRIEN REPARIEREN

Mit einem bakteriellen Toxin lässt sich die DNA in Mitochondrien gezielt verändern. Damit könnten Erbkrankheiten bekämpft werden, die auf Mutationen im mitochondrialen Genom beruhen.

ALAMY / SCOTT CAMAZINE



ENERGIEPAKET
Die elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt ein Mitochondrium (türkis). Damit produziert die Zelle ihre Energie.

► Mitochondrien, die »Kraftwerke« der Zellen, besitzen unabhängig vom Zellkern ein eigenes Genom. Hier liegt die Information für lediglich 13 Proteine, die alle an der Energiegewinnung der Zelle mitwirken. Mutationen in dieser mitochondrialen DNA (mtDNA) können beim Menschen eine Reihe von unheilbaren lebensbedrohlichen Stoffwechselkrankheiten auslösen. Genetiker suchen daher schon lange nach einem Weg, um in das Erbgut der Zellorganellen einzugreifen. Ein solches Werkzeug, mit dem sich zum ersten Mal die mtDNA präzise verändern lässt, präsentieren nun Wissenschaftler um den Biochemiker David Liu von der Harvard University in Cambridge (USA). Der Schlüssel ihres Erfolgs lag in der Entdeckung eines Toxins, mit dem bestimmte Bakterien konkurrierende Keime vernichten.

Bei diesem vom Bakterium *Burkholderia cenocepacia* hergestellten Enzym handelt es sich um eine Cytidin-Desaminase, die den Nukleinsäurebaustein Cytosin (C) in Uracil (U) umwandelt. Das Besondere hierbei: Alle bislang bekannten Vertreter solcher Proteine funktionieren nur bei einzelsträngiger DNA. Genetiker mussten daher die beiden Stränge der DNA mit Nukleasen aufschneiden, wenn sie gezielt eingreifen wollten. Das von den Forschern um Liu auf das Kürzel DddA_{tox} (double-stranded DNA deaminase toxin A) getaufte Enzym setzt dagegen direkt am Doppelstrang an, so dass es sich hervorragend für die Bearbeitung des mitochondrialen Genoms eignet.

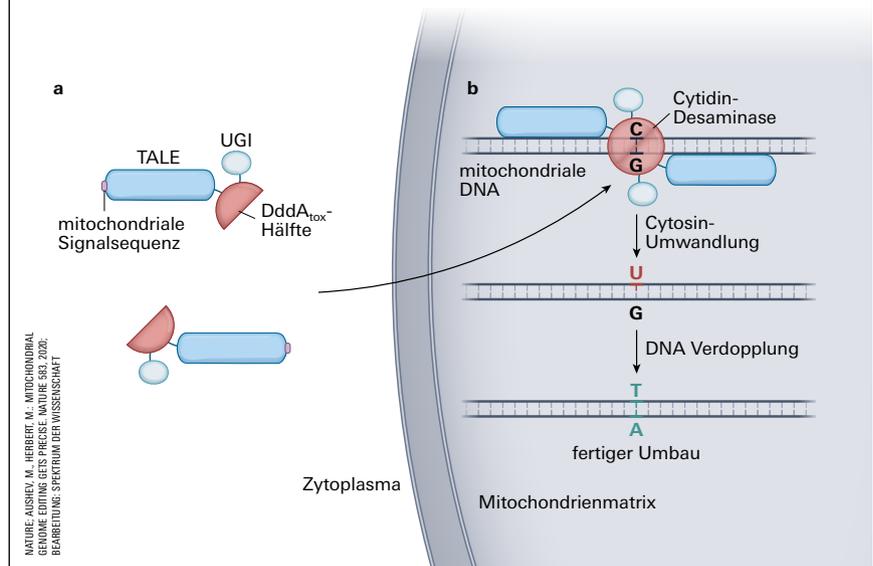
Hierzu mussten die Wissenschaftler allerdings erst einige Hürden überwinden. So wirken Cytidin-Desaminasen toxisch auf Säugerzellen, da sie jedes Cytosin zu Uracil umbauen, das ihnen in die Quere kommt. Deshalb spalteten Liu und seine Kollegen DddA_{tox} in zwei inaktive Teile. An jede Hälfte knüpften die Forscher ein Protein namens TALE (transcription activator-like effector), das wiederum spezifisch modifiziert werden kann, um sich an ganz bestimmte Stellen eines DNA-Strangs zu heften. Die Anlagerung der beiden TALE-Proteine an die entsprechende

Die mtDNA-Schere

Forscher um David Liu haben ein Werkzeug zur Veränderung mitochondrialer DNA (mtDNA) entwickelt. Herzstück des DdCBE (DddA-derived cytosin base editor) genannten Konstrukts ist das geteilte und damit inaktive Bakterientoxin DddA_{tox}. An diesem sitzen ein Uracil-DNA-Glykosidase-Inhibitor (UGI) sowie das Protein TALE, das sich an spezifische Stellen eines DNA-Strangs binden kann. Eine Aminosäuresignalsequenz sorgt für den Transport durch die mitochondriale Doppelmembran (links).

Beim Eintritt von DdCBE in das Mitochondrium geht die Signalsequenz verloren. Über das Protein TALE heften sich die beiden Teile an eine ganz bestimmte Position der mtDNA, wo das Nukleinbasenpaar Cytosin-Guanin (C-G) sitzt. Die DddA_{tox}-Hälften sind damit vereint und wandeln als Cytidin-Desaminase die Base C in Uracil (U) um (rechts). Das Protein UGI schützt den neuen Baustein U, der normalerweise aus einer DNA entfernt werden würde.

Bei der nächsten DNA-Verdopplung paart sich U statt mit G nun mit der Base Adenin (A), die wiederum Thymin (T) als Bindungspartner wählt. Im Endeffekt hat sich somit der Baustein C-G in T-A verwandelt.



Position im Genom fügt dann die DddA_{tox}-Hälften zusammen und aktiviert sie dadurch.

Damit DddA_{tox} die mtDNA erreicht, muss es zunächst die Doppelmembran der Zellorganellen überwinden. Hierzu markierten die Wissenschaftler das Konstrukt mit einer Aminosäuresignalsequenz, die von Transportproteinen in der Mitochondrienmembran erkannt wird. In der Ausnutzung solcher zelleigenen Transportsysteme liegt der große Vorteil dieser Methode gegenüber der mit dem Chemie-Nobelpreis

2020 ausgezeichneten und auf RNA basierenden CRISPR-Cas9-Editierung. Denn Letztere versagt bislang bei Mitochondrien, vermutlich weil den Organellen ein RNA-Transportsystem fehlt.

Die nächste Herausforderung lag in der Tatsache, dass beim Umbau durch Cytidin-Desaminasen die RNA-Base U entsteht, die in DNA normalerweise gar nicht vorkommt. Daher gibt es dafür einen Reparaturmechanismus: Stößt das Enzym Uracil-DNA-Glykosidase im DNA-Strang auf ein U, schneidet es

den Baustein heraus und ersetzt ihn wieder durch C.

Dies verhinderten Liu und seine Kollegen, indem sie ihre TALE-DddA_{tox}-Hälften mit einem Uracil-DNA-Glykosidase-Inhibitor (UGI) kombinierten, der den neu gebildeten Baustein U schützt. Bei einer DNA-Verdopplung verhält sich Uracil wiederum wie die strukturell ähnlich gebaute DNA-Base Thymin (T) und paart sich mit dessen Gegenstück Adenin (A). Somit verwandelt sich ein in der mtDNA vorliegendes Basenpaar Cytosin-Guanin (C-G) zu Uracil-Adenin (U-A), aus dem in der nächsten Verdopplungsrunde das Paar Thymin-Adenin (T-A) wird. Der Inhibitor verachtfachte die Effizienz dieser Genomeditierung.

Hohe Erfolgsrate mit wenig Fehlern

Das fertige Konstrukt mit dem Kürzel DdCBE (DddA-derived cytosin base editor) bestand somit aus einer Signalsequenz für den Membrantransport, dem Protein TALE, einer DddA_{tox}-Hälfte sowie dem Schutzprotein UGI (siehe »Die mtDNA-Schere«). Wie sich herausstellte, vermochte es, in Mitochondrien menschlicher Zellen einzudringen und hier gezielt mitochondriale Gene zu modifizieren, wobei es bis zu 49 Prozent der C-G-Basenpaare zu T-A umwandelte. Diese Rate hing von verschiedenen Faktoren ab, wie dem Abstand zwischen den beiden DdCBE-Untereinheiten, der Gestaltung von TALE, der Orientierung der DddA_{tox}-Hälften oder der Position des zu ersetzenden Cytosins.

Ein wichtiger Punkt bei allen Genomeditierungswerkzeugen ist die Frage, ob sie die Nukleinsäure auch an Stellen verändern, wo sie es gar nicht sollen. Beim Vergleich von editierten Zellen mit unveränderten Kontrollen stießen Liu und Co. im Genom des Zellkerns auf keine solchen Off-Target-Effekte. Bei der mtDNA traten kaum Fehler auf; lediglich ein Gen fiel hier aus dem Rahmen – vermutlich auf Grund der Struktur des eingesetzten TALE-Proteins.

Welches therapeutische Potenzial birgt die neue Methode? Theoretisch sollte sich durch die Korrektur von C-G zu T-A bis zur Hälfte des Genoms

DdCBE kann Mitochondrienmutationen nicht vollständig beseitigen, sondern nur vermindern

editieren lassen, denn bei jeder Verdopplung erhalten die beiden neuen mtDNA-Stränge eine veränderte und eine unveränderte Version. Tatsächlich schwankte die Rate in den Versuchen zwischen 5 und 49 Prozent. Ein begrenzender Faktor ist, dass die aktuelle Technik den Baustein C nur an jenen Stellen effizient ersetzen kann, denen im Erbgutstrang ein T vorausgeht. Andererseits hielt die Aktivität von DdCBE über mehrere Tage an; womöglich weil auch bei nachfolgenden Verdopplungsschritten das Erbgut modifiziert wird, was die Rate erhöhen sollte. Ob hierbei allerdings vermehrt Fehler auftreten, müssen weitere Studien klären.

Insgesamt betrachtet kann DdCBE also Mutationen im mitochondrialen Genom nicht vollständig beseitigen, sondern nur vermindern. Weil sich aber die Symptome bei mtDNA-Erkrankungen mit der Anzahl an Mutationen verschlimmern, erscheint die Aussicht, diese zu senken, durchaus als therapeutisch viel versprechend.

Bei Mäusen gelang bisher die Korrektur von mtDNA-Mutationen durch spezifische Nukleasen, welche die mutierten Stränge angreifen. Da ein Mitochondrium zahlreiche mtDNA-Kopien enthält, werden dadurch lediglich die Stränge mit der schädlichen Erbgutveränderung eliminiert. Bei hoher Mutationsbelastung besteht jedoch das Risiko, dass dann insgesamt zu wenige mtDNA-Kopien übrig bleiben. Und wenn sämtliche mtDNA-Stränge von der Mutation betroffen sind, verbietet sich die Methode ohnehin. Das neue mtDNA-Präzisionswerkzeug kann dagegen die Muta-

tionszahl senken, ohne die Kopienzahl zu verringern.

Hat DdCBE vielleicht sogar das Potenzial, die Übertragung mitochondrialer Krankheiten zu verhindern? Zellorganellen werden mütterlicherseits weitergegeben. Gegenwärtig lässt sich die Vererbung von mtDNA-Mutationen unterbinden, indem man den Zellkern einer betroffenen Eizelle in eine Spenderzelle mit gesunden Mitochondrien transplantiert. Ein direkter Eingriff ins mitochondriale Genom von Eizellen oder Embryonen böte theoretisch eine Alternative. Allerdings findet in den ersten fünf bis sechs Tagen der menschlichen Entwicklung vermutlich keine mtDNA-Verdopplung statt, so dass das eingefügte Uracil länger geschützt werden müsste.

Auf jeden Fall bringt uns die Arbeit von Liu und seinen Kollegen bei der Suche nach Gentherapien für mtDNA-Erkrankungen einen entscheidenden Schritt weiter. Da sich mit dem Editierwerkzeug Mitochondrien experimentell verändern lassen, können wir so auch die Bedeutung von mtDNA-Mutationen bei komplexen Krankheiten wie Krebs oder altersbedingten zellulären Funktionsstörungen im Labor erforschen. Die Studie dürfte zudem andere Wissenschaftler dazu inspirieren, die Einsatzmöglichkeiten und die Effizienz von DdCBE auszuweiten oder nach weiteren viel versprechenden Genomeditierungsmethoden zu fahnden. ◀

Magomet Aushev ist promovierter Genetiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Newcastle University (Großbritannien).

Mary Herbert ist dort Professorin für Reproduktionsbiologie. Beide forschen am Wellcome Center for Mitochondrial Research.

QUELLE

Mok, B. Y. et al.: A bacterial cytidine deaminase toxin enables CRISPR-free mitochondrial base editing. *Nature* 583, 2020

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 583, S. 521–522, 2020

KOMBINATORIK UNORDENTLICHE GRAPHEN

Je größer ein Netzwerk wird, desto leichter lassen sich gewisse Strukturen darin erkennen. Dafür muss ein Graph aber sehr viel mehr Punkte enthalten als gedacht, wie Mathematiker nun gezeigt haben.

► Nach mehr als 70 Jahren sind Mathematiker endlich einem der hartnäckigsten Zahlenwerte etwas näher gekommen. In einer noch nicht begutachteten Arbeit lieferten David Conlon vom Caltech und Asaf Ferber von der University of California in Irvine im September 2020 die bisher genaueste Schätzung für so genannte mehrfarbige Ramsey-Zahlen. Diese geben an, wie groß ein Netzwerk sein darf, bevor zwangsläufig bestimmte Arten von Mustern auftreten. »Im Universum gibt es keinen absoluten Zufall«, so Maria Axenovich vom Karlsruher Institut für Technologie. »Man findet immer geordnete Grup-

pen, und Ramsey-Zahlen stellen ein Maß dafür dar.«

Ein Graph oder Netzwerk ist eine Sammlung von Punkten, die durch Kanten miteinander verbunden sind. Mathematiker möchten verstehen, wie groß ein Netzwerk mindestens sein muss, damit zwingend verschiedene Arten von Unterstrukturen entstehen. »Wenn man einen Graphen vor sich hat, der groß genug ist, dann ist ein Teil davon geordnet«, erklärt Maria Chudnovsky von der Princeton University.

Ramsey-Zahlen beziehen sich auf ein Muster, das man als monochromatische Clique bezeichnet: Das ist eine

Menge von Punkten, die jeweils durch Kanten derselben Farbe miteinander verbunden sind, nachdem man einen Graphen koloriert hat.

Je nach der Größe der gesuchten Clique und Anzahl der Farben, die man verwendet, variieren die Ramsey-Zahlen. Leider sind die meisten davon unbekannt, weil die Netzwerke – bis auf die aller kleinsten – schnell sehr kompliziert werden. Häufig können Mathematiker daher nur einen möglichen Wertebereich angeben, in dem die Ramsey-Zahlen liegen. Es ist, als wolle man den Standort eines Freunds herausfinden, würde aber bloß erfahren, dass er sich nördlich

Spektrum LIVE

Island mit Mol Reisen

4.–15.
AUGUST
2021

Kommen Sie mit auf eine Reise zu Islands faszinierender Geologie. Die Erkundung der Halbinsel Snæfellsnes im Westen Islands mit dem Vulkan Snæfellsjökull wird wissenschaftlich begleitet von Prof. Dr. Sonja Philipp. Rücktritt bis sechs Wochen vor der Reise möglich! Weitere Details: <https://mol-reisen.de/island-geologie/>

Mit dem Code »Spektrum« bei Buchung der Reise erhalten Spektrum-Leser für sich und maximal eine mitreisende Person einen Rabatt von fünf Prozent auf den Reisepreis (Zusatzleistungen ausgeschlossen).

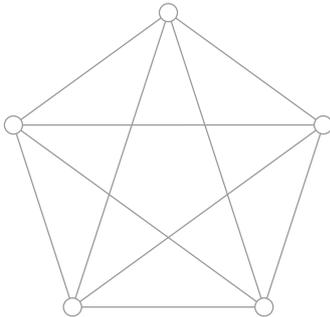
Infos und Anmeldung:

Spektrum.de/live

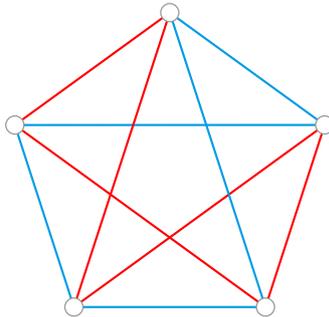
Was sind Ramsey-Zahlen?

Ramsey-Zahlen sind ein Maß dafür, wie groß Netzwerke werden können, bevor sich zwangsläufig Muster ausbilden.

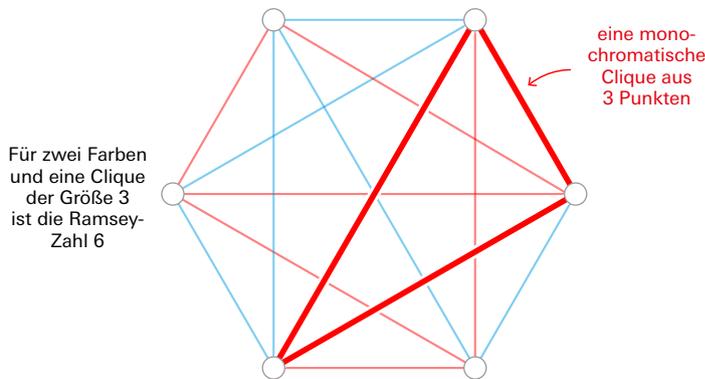
Verbinde die fünf Punkte, um einen vollständigen Graphen zu erhalten (jeder Punkt muss mit allen anderen zusammenhängen, was zehn Verbindungen ergibt).



Es ist möglich, den Graphen blau und rot einzufärben, ohne dass drei Punkte über gleichfarbige Kanten miteinander verbunden sind.



Bei Netzwerken der Größe sechs lässt sich das allerdings nicht vermeiden. Man findet immer drei Punkte, die über gleichfarbige Kanten zusammenhängen.



Für zwei Farben und eine Clique der Größe 3 ist die Ramsey-Zahl 6

eine monochromatische Clique aus 3 Punkten

SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE

von München und südlich von Hamburg befindet.

Die Arbeit von Conlon und Ferber schränkt den Wert von Ramsey-Zahlen stärker ein als jedes andere Ergebnis, seit Paul Erdős (1913–1996) das Problem in den 1930er und 40er Jahren erstmals untersuchte. Die zwei Forscher fanden eine neue untere Schranke für mehrfarbige Ramsey-Zahlen, die exponentiell größer ist als die vorherige beste Schätzung. Damit sind Mathematiker der Hoffnung etwas näher gekommen, das spannende Zusammenspiel von Ordnung und Zufall in Graphen zu verstehen.

Der britische Universalgelehrte Frank Ramsey (1903–1930) führte in

den 1920er Jahren die nach ihm benannten Zahlen ein. Sie lassen sich am besten durch ein Beispiel veranschaulichen: Man beginnt mit fünf Punkten und verbindet sie alle miteinander, wodurch ein so genannter vollständiger Graph entsteht. Nun stellt sich die Frage, ob es möglich ist, die insgesamt zehn Kanten rot oder blau zu kolorieren, ohne dass drei Punkte durch die gleiche Farbe zusammenhängen. Für dieses Beispiel lautet die Antwort Ja.

Bei einem zweifarbigem Netzwerk aus sechs Punkten gibt es dagegen keine Möglichkeit, eine monochromatische Clique der Größe drei zu vermeiden. Daher beträgt die Ramsey-Zahl

für zwei Farben und Dreier-Cliquen sechs.

Mathematiker kennen nur von sehr wenigen Ramsey-Zahlen den exakten Wert. Für Cliquen aus fünf Punkten weiß man bei zwei Farben beispielsweise lediglich, dass die Zahl zwischen 43 und 48 liegt. »Es ist wirklich peinlich«, sagt der Doktorand Yuval Wigderson von der Stanford University. »Wir arbeiten seit fast 100 Jahren an diesem Problem und wissen so gut wie nichts.«

Graphen werden schnell ungeheuer komplex, sobald sie viele Punkte enthalten. Bei einem Netzwerk der Größe sechs und zwei Farben kann man alle möglichen Kolorationen händisch abzählen. Bei 40 Punkten gibt es aber bereits 2^{780} verschiedene Arten, die Kanten zu färben. Daher versuchen Mathematiker, die hartnäckigen Ramsey-Zahlen einzukreisen. Sie führen Beweise, wonach der exakte Wert größer als eine bestimmte Untergrenze und kleiner als eine Obergrenze sein muss.

Erdős und sein Kollege George Szekeres stellten 1935 die erste Bedingung dieser Art auf. Demnach sind zweifarbige Ramsey-Zahlen kleiner als 4^t (27^t für dreifarbige), wobei t die Größe der monochromatischen Clique ist. Ein Jahrzehnt später fand Erdős die ersten Untergrenzen: Für zwei Farben berechnete er $(\sqrt{2})^t$ und für drei $(\sqrt{3})^t$. Das heißt, ein Graph muss mehr als $(\sqrt{2})^t$ und weniger als 4^t Punkte enthalten, damit bei zwei Farben zwingend eine einfarbige Clique der Größe t entsteht. Das Ergebnis ist nicht besonders genau, denn die Werte $(\sqrt{2})^t$ und 4^t können sich stark unterscheiden, insbesondere wenn t groß ist. Dennoch erklärt es, wie Ramsey-Zahlen mit zunehmenden Cliquen anwachsen.

Daher war der bedeutendste Beitrag von Erdős in diesem Bereich nicht die tatsächliche Berechnung der Grenzen, sondern die Methode, mit der ihm das gelang. Stellen Sie sich dazu einen vollständigen Graphen aus zehn Punkten und 45 Kanten vor. Nun möchte man ihn mit drei Farben kolorieren, ohne eine monochromatische Clique der Größe fünf (mit insge-

samt zehn Verbindungen zwischen den fünf Punkten) zu erzeugen.

Dafür färbte Erdős die Kanten zunächst nach dem Zufallsprinzip. Die Wahrscheinlichkeit, zehn gleichfarbige Verbindungen zu erhalten, lässt sich leicht bestimmen: ein Drittel für jede Kante, also $(\frac{1}{3})^{10}$ – und das Ganze mal drei, da es drei verschiedene Farben zur Auswahl gibt. Anschließend betrachtete Erdős alle möglichen Cliques aus fünf Punkten, insgesamt 252, und berechnete die Wahrscheinlichkeit dafür, dass mindestens eine von ihnen aus nur einer Farbe besteht. Gemäß einer der so genannten Bonferroni-Ungleichungen ist das Ergebnis stets kleiner oder gleich der Wahrscheinlichkeit, eine einfarbige Clique in einem zufällig kolorierten Netzwerk zu finden.

Solange das Resultat also unter eins liegt, gibt es nicht zwingend eine monochromatische Clique. Im betrachteten Beispiel von zehn Punkten und drei Farben erhält man den Wert 0,0128. Das heißt, derartige Cliques

sind vermeidbar, daher ist die entsprechende Ramsey-Zahl größer als die Anzahl der Punkte des Graphen (zehn).

Mit dieser probabilistischen Methode lassen sich untere Schranken für Ramsey-Zahlen bestimmen. Denn solange die zufälligen Färbungen nicht zwingend eine einfarbige Clique hervorbringen, gibt es auf jeden Fall einen Weg, den Graphen entsprechend einzufärben. Falls der berechnete Wert die Eins überschreitet, könnte es aber immer noch möglich sein, monochromatische Cliques durch geschickte Koloration zu vermeiden. Anstatt aufwändig Beispiele für passende Graphen zu suchen, in denen es keine einfarbigen Cliques gibt, bewies Erdős, dass diese cliquenlosen Kolorationen existieren – ohne konkret zu zeigen, wie das bunte Netzwerk aussieht.

Während der nächsten sieben Jahrzehnte gelang es Mathematikern nur einmal, im Jahr 1975, die Untergrenze von Erdős für zwei und drei Farben zu verbessern. Zwar widmeten

sich viele diesem Problem, aber niemand fand einen besseren Weg als die probabilistische Methode, um Ramsey-Zahlen zu berechnen. »Die Schwierigkeit bestand darin, die Grenze, die sich aus einer zufälligen Färbung ergibt, zu überwinden«, erklärt Conlon. Und genau das gelang ihm zusammen mit seinem Kollegen Ferber im Herbst 2020: Die Forscher fanden eine neue untere Grenze für Ramsey-Zahlen mit mindestens drei Farben.

Bis dahin betrug die Untergrenze für drei verschiedene Farben $(\sqrt{3})^t$ (ungefähr $1,73^t$) und für vier 2^t . Ferber und Conlon erhöhten diese auf $1,834^t$ für drei und $2,135^t$ für vier Farben. Selbst wenn die Unterschiede auf den ersten Blick klein erscheinen, stellen sie enorme Fortschritte dar. Sucht man nach großen einfarbigen Cliques (wodurch auch t groß ist), macht sich die veränderte Basis deutlich bemerkbar. Das heißt, Graphen müssen sehr viel mehr Punkte enthalten

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)



als gedacht, bevor sich zwingend eine gewisse Ordnung ausbildet.

Um das zu beweisen, suchten die beiden Forscher eine Färbemethode, die das Entstehen monochromatischer Cliques unwahrscheinlich macht. Dazu trugen sie zuerst eine Farbe (zum Beispiel Rot) nach einem festen Schema auf, bevor sie die restlichen Farben nach dem Zufallsprinzip verteilten. Um zu entscheiden, welche Kante rot sein

soll, verfrachteten sie das Netzwerk in eine besondere Art von geometrischem Raum, in dem sie jedem Punkt eine Reihe von Koordinaten zuordnen konnten.

Zunächst quadrierten und addierten die Forscher die Koordinaten der jeweiligen Punkte. Durch die spezielle Beschaffenheit des geometrischen Raums erhielten sie dadurch entweder das Ergebnis null oder eins. Conlon

und Ferber konzentrierten sich auf jene Punkte mit Quadratsumme null und berechneten daraufhin das so genannte innere Produkt aller übrigen Punktepaare (das innere Produkt ist eine Standardoperation der linearen Algebra, ein Beispiel dafür ist das Skalarprodukt). Wenn das Verfahren einen bestimmten Wert lieferte, färbten sie die Verbindung zwischen dem Punktepaar rot. Die restlichen Kanten erhielten anschließend nach dem Zufallsprinzip eine blaue oder gelbe Farbe.

Der zweistufige Ansatz erwies sich als gute Möglichkeit, um einfarbige Cliques zu vermeiden. Durch den ersten Schritt verteilen sich die roten Kanten gleichmäßig über den gesamten Graphen. Damit ergeben sich zwei wünschenswerte Eigenschaften: Es entstehen keine großen roten Cliques, zudem brechen die roten Kanten das Netzwerk auf, wodurch weniger Raum für Cliques anderer Farben bleibt.

Damit haben die zwei Mathematiker nicht nur ein bedeutendes Ergebnis erzielt, sondern auch weitere Fortschritte ermöglicht. Nur wenige Tage nach der Veröffentlichung ihrer Arbeit gelang es Wigderson, mit der Methode von Conlon und Ferber die untere Grenze für Ramsey-Zahlen für vier oder mehr Farben nochmals anzuheben. Nach jahrzehntelangem Stillstand scheint der Damm damit endlich gebrochen zu sein. ◀

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

QUELLEN

Conlon, D., Ferber, A.: Lower bounds for multicolor Ramsey numbers. ArXiv 2009.10458, 2020

Wigderson, Y.: An improved lower bound on multicolor Ramsey numbers. ArXiv 2009.12020, 2020

Von »Spektrum.de« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Disorder Persists in Larger Graphs, New Math Proof Finds« 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.

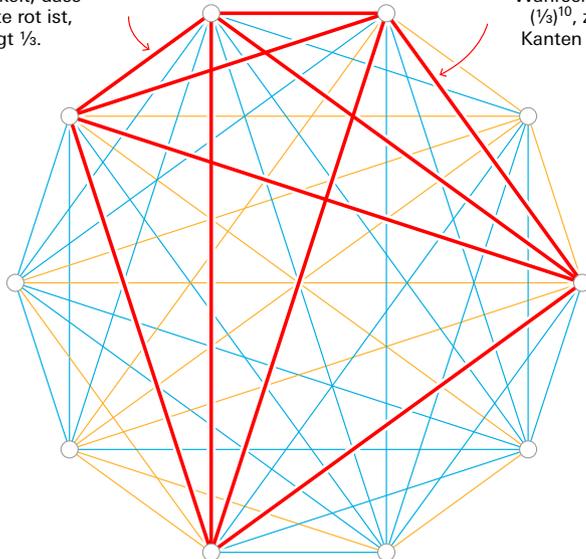
Die Erdős-Methode

Paul Erdős entwickelte einen probabilistischen Ansatz, um Ramsey-Zahlen zu berechnen:

1 Man beginnt mit einem vollständigen Graphen aus zehn Punkten und koloriert die Verbindungen mit drei Farben. Findet man dann zwangsläufig fünf Punkte, die durch zehn gleichfarbige Kanten zusammenhängen?

2 Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Kante rot ist, beträgt $\frac{1}{3}$.

3 Damit ist die Wahrscheinlichkeit $(\frac{1}{3})^{10}$, zehn rote Kanten zu finden.

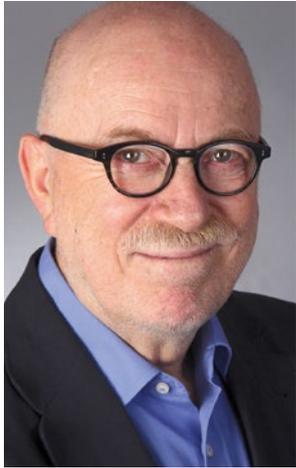


4 Es gibt drei verschiedene Farben, die zu einer monochromatischen Clique führen können.

5 Die Anzahl aller Cliques aus fünf Punkten im Graph beträgt 252.

$$\left(\frac{1}{3}\right)^{10} \times 3 \times 252 = 0.0128$$

Das Ergebnis ist stets kleiner oder gleich der Wahrscheinlichkeit, eine einfarbige Clique zu erzeugen, wenn man die Kanten zufällig koloriert. Da das Resultat kleiner als eins ist, existieren Graphen mit zehn Punkten, in denen man keine solche Clique der Größe fünf findet. Daher ist die Ramsey-Zahl mindestens elf.



SPRINGER'S EINWÜRFE NEUE ENERGIE FÜR AFRIKA

Können viele Länder des Erdteils die Phase fossiler Stromversorgung überspringen und gleich auf erneuerbare Energien setzen? Modellrechnungen verdeutlichen die Chancen und Probleme.

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/1823156

Die wirtschaftliche Erfolgsgeschichte der Industrieländer hat auf der Nutzung von Kohle, Öl und Erdgas beruht. Angesichts der heute unübersehbaren Nebenwirkungen wie Umweltschäden und Klimawandel kämpfen die Nationen jetzt mit dem Übergang zu erneuerbaren Energiequellen. Die Regionen mit den stärksten Emissionen – Nordamerika, Europa und China – haben sich mehr oder weniger bindend vorgenommen, ab Mitte des Jahrtausends klimaneutral zu wirtschaften.

Doch was ist mit den Entwicklungsländern? Müssen sie erst einmal die industrielle Revolution nachholen und dabei den fossilen Energiepfad beschreiten, um anschließend auf Sonne, Wind und Wasserkraft umzusteigen? Oder können sie die klimaschädliche Phase einfach auslassen und ihren Lebensstandard gleich mit Hilfe regenerativer Quellen deutlich anheben?

Für das elegante Überspringen der fossilen Wirtschaft, in der Fachwelt Leapfrogging genannt, sprechen die Effizienz, welche Fotovoltaik und Windkraftanlagen in den vergangenen Jahrzehnten erreicht haben, sowie die hohe Verfügbarkeit von Sonne und Wind in den Tropen. Am Beispiel Afrikas haben Forscher nun die Chancen und Hemmnisse des Leapfrogging auf Basis umfangreicher Datensätze durchgerechnet.

Die Umweltökonomin Galina Alova von der University of Oxford und ihr Kollege Philipp Trotter von der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen erstellten ein Programm, das aus Informationen über laufende und geplante Kraftwerke Zukunftsszenarien zu entwickeln vermag. Die Algorithmen sind zu maschinellem Lernen fähig; sie werden anhand historischer Daten trainiert, indem sie zunächst Zielpunkte in der Vergangenheit anpeilen und diese Szenarien mit der dann tatsächlich eingetretenen Situation abgleichen. Dadurch lernt das Programm schließlich, fundierte Prognosen über die künftige

Energieentwicklung Afrikas zu liefern (*Nature Energy* 10.1038/s41560-020-00755-9, 2021).

Wie die Forscher angesichts der erstmals so komplett erhobenen Daten betonen, ist die Ausgangslage dem Leapfrogging wenig förderlich. Afrikas Strom wird derzeit zu 80 Prozent fossil erzeugt. Damit trägt der Kontinent zunehmend zum globalen CO₂-Ausstoß bei – und im Bezug auf das starke Wachstums von Bevölkerung und Wirtschaft droht das, sofern nicht umgesteuert wird, in den kommenden Jahrzehnten noch viel schlimmer zu werden. Windkraftanlagen spielen vorderhand kaum eine Rolle. Solaranlagen werden zwar überall eifrig gebaut, tragen aber nur wenige Prozent zum Energiemix bei.

Was tun? Alova und Trotter weisen auf die speziell in Afrika große Planungsunsicherheit bei der Stromerzeugung hin; sie empfehlen deshalb, derzeit beabsichtigte Wärmekraftwerke gar nicht erst zu errichten und dafür auf erneuerbare Energien zu setzen. Entscheidend für dieses Umsteuern wären einerseits gezielt eingesetzte Finanzmittel der internationalen Entwicklungshilfe und andererseits die konsequente Förderung durch die jeweilige Regierung.

Erfahrungsgemäß reagieren dezentrale Versorger besonders beweglich auf den Wechsel zum regenerativen Pfad. In Indien beispielsweise versorgen viele lokale Solaranlagen kleinere Betriebe direkt, anstatt ihren Strom ins nationale Netz einzuspeisen. Auch in Afrika könnte die Beispielwirkung solcher Erfolge für mehr Sonne im Energiemix sorgen.

Die Szenarien besagen: Wenn es Afrika bis 2030 nicht gelingt, sich von fossilen Energieträgern zu lösen, könnte es dafür zu spät werden. Ein baldiger radikaler Wechsel zur Solarwirtschaft wäre – um einen bekannten Mondfahrerspruch abzuwandeln – ein großer Sprung für Afrika und ein wichtiger Schritt für die Menschheit.



PALÄOANTHROPOLOGIE VERWIRRENDE VIELFALT DES *HOMO ERECTUS*

Der Vorläufer von *Homo sapiens* verblüfft durch seine Uneinheitlichkeit. Neue Fakten erweitern das Bild dieses Frühmenschen – und lassen den herkömmlichen Artbegriff verschwimmen.

Thorwald Ewe ist Wissenschaftsjournalist. Er schreibt vor allem über Themen aus Anthropologie und Archäologie.

» spektrum.de/artikel/1823135



AUF EINEN BLICK FLEXIBLER ERFOLGSTYP

- 1** Kein anderer unserer Vorfahren weist derart drastische Unterschiede von Individuum zu Individuum auf wie *Homo erectus* – sowohl in Körpergröße als auch bei den Schädelmerkmalen.
- 2** Jüngst entdeckte ein Forscherteam, dass er auch im Verhalten überraschend flexibel war: So nutzte er parallel ertümliches und fortschrittlicheres Werkzeug.
- 3** Genetiker fanden Spuren mehrerer Kreuzungen von moderneren Menschenformen mit einer älteren, »superarchaischen« Spezies – vermutlich *Homo erectus*.

FRÜHMENSCH Vor zirka 1,6 Millionen Jahren lebte ein *Homo-erectus*-Junge dort, wo heute Kenia liegt. Die Rekonstruktion des Jungen im Neanderthal Museum beruht auf einem Skelettfund.

Kein Zweifel: *Homo erectus* hat die unangefochtene Pionierrolle in unserer Ahnenreihe. Er war der erste Hominine, der in seinen Körpermaßen und Proportionen dem Menschen der Gegenwart ähnelte, und der erste, der in der Savanne vom Gejagten zum Jäger wurde. Und vermutlich als Erster nutzte er das Feuer.

Damit nicht genug. *Homo erectus* (von lateinisch *erectus* = aufgerichtet) ist laut Fundlage der früheste Hominine, der sich von Afrika aus nach Eurasien ausgebreitet hat. Out-of-Africa I nennen die Paläoanthropologen das Szenario dieser ersten Expansion aus der Menschheitswiege. Sie hat offenbar ziemlich rasch nach dem Auftritt des *Homo erectus* auf der Weltbühne stattgefunden: Zwei Millionen Jahre alt ist das bislang früheste Fossil, ein Kinderschädel mit der Katalognummer DNH 134. Der Paläoanthropologe Andy Herries hat es vor wenigen Jahren im Höhlensystem von Drimolen in Südafrika entdeckt. Und bereits vor 1,8 Millionen Jahren taucht die Menschenform in Eurasien auf, an einer Fundstelle im georgischen Dmanisi im Kaukasus (siehe »Die ersten Weltbürger«). Von da an war sie in fast ganz Eurasien präsent, von Spanien bis nach China. Nach *Homo sapiens* ist *Homo erectus* die am weitesten verbreitete Menschenform aller Zeiten. Der vorläufige Endpunkt dieser Pionierkarriere wurde 2019 markiert: Bei einer Neudatierung der Fundstelle von Ngandong auf der indonesischen Insel Java bestimmte eine Forschergruppe um Yan Rizal vom Institute of Technology in Bandung das letzte Auftreten in die Zeit von 117 000 bis 108 000 Jahren vor heute.

Somit überspannt diese Art eine Ära von fast 1,9 Millionen Jahren. Das berechtigt zu einem weiteren Superlativ. *Homo erectus* ist mit Abstand die bislang erfolgreichste Spezies der Gattung *Homo*. Zum Vergleich: Den anatomisch modernen Menschen als einzige heute noch existierende Menschenform unseres Planeten gibt es seit gerade einmal 300 000 Jahren. So alt sind die frühesten *Sapiens*-Funde aus Djebel Irhoud in Marokko. Dennoch wirft *Homo erectus* immer noch große Fragen bei den Paläoanthropologen auf. In Anlehnung an den Philosophie-Bestseller von Richard David Precht könnte das größte Rätsel so lauten: »Wer war *Homo erectus* – und wenn ja, wie viele?«

Eine Art – viele Namen?

Seit mehr als einem Jahrhundert sind Forscher an diversen Fundstellen der Alten Welt auf fossile Schädelreste gestoßen, die charakteristische Gemeinsamkeiten aufweisen: dickwandige Knochen, vorspringende Überaugenwülste, lang gezogene und niedrige Hirnschädel. Ab der Mitte des 20. Jahrhunderts begann sich die Sammelbezeichnung *Homo erectus* zu etablieren. Weil diese Schädel jedoch aus verschiedenen Zeiten und geografischen Zonen oft etwas unterschiedlich aussehen, erlagen einige Paläoanthropologen der Versuchung, separate Artnamen zu vergeben: *Homo ergaster*, *Homo georgicus*, *Homo rhodesiensis*, *Homo heidelbergensis*. Zwei wissenschaftliche Denkschulen lieferten sich bis heute heiße Gefechte. Die so genannten »Lumper«, zu Deutsch »Zusammenwerfer«, tendieren dazu,

Jäger und Koch

Homo erectus ist der erste Frühmensch mit Körpermaßen, die denen des anatomisch modernen Menschen entsprechen: deutlich längere Beine als Arme, lange Gliedmaßen im Vergleich zum Torso, zwischen etwa 1,4 und 1,8 Meter groß und 40 bis 65 Kilogramm schwer, mit Gehirnvolumina von knapp 600 Kubikzentimetern beim frühen und 1250 Kubikzentimetern beim späten *Erectus*-Menschen. Auch die frühesten Vertreter der Gattung *Homo* – *Homo rudolfensis* (vor 2,8 bis 1,8 Millionen Jahren) und *Homo habilis* (vor 2,1 bis 1,5 Millionen Jahren) – gingen permanent aufrecht. Doch das Skelett von *Homo habilis* ähnelt weitgehend dem der vormenschlichen Australopithecinen, und *Homo rudolfensis* hatte ein noch relativ urtümliches Gebiss.

Der Vergleich zwischen der 2,9 Millionen Jahre alten »Lucy«, einem *Australopithecus afarensis*, und dem 1,6 Millionen Jahre alten, zum Zeitpunkt seines Todes etwa zwölfjährigen *Homo erectus* KNM-WT 15000 (»Nariokotome Boy« oder »Turkana Boy«) wäre noch weit drastischer ausgefallen: Während die äußerlich schimpanzenähnliche Lucy mit höchstens 1,2 Meter Größe und überlangen Armen nur plattfüßig watscheln konnte, wäre der 1,7 Meter große, schlaksige Nariokotome Boy ihr mit federnden Sätzen vorausgespurtet. Zum Leben als Savannendauerläufer gehörte, dass *Homo erectus* höchstwahrscheinlich der erste Hominine ohne komplette Körperbehaarung und mit Schweißdrüsen war: Das Traben über große Distanzen erfordert die Fähigkeit zum Schwitzen, weil der

Körper sich sonst überhitzt und ein Kreislaufzusammenbruch droht. Als Folge des Haarverlusts musste die Menschenform zum UV-Schutz dunkle Hautpigmente entwickeln.

Der Kühlungstrick verschaffte gewaltige Vorteile. Während die großen Raubtiere der Savanne in sengender Tageshitze im Schatten von Bäumen ruhen mussten und erst in der Dämmerung aktiv wurden, war *Homo erectus* der erste Hominine, der vom Gejagten – über die Zwischenstufe des Fleischdiebs an Raubtierrissen – schließlich zum tagaktiven Ausdauerjäger wurde. Er war vermutlich der Erste, der glimmende Holzstücke aus Blitz einschlägen und Buschbränden nutzte, um ein Lagerfeuer zu unterhalten und rohe Nahrung durch Erhitzen besser kau- und verdaubar zu machen.



KALOTTE Der 1,5 bis 1,6 Millionen Jahre alte, fragmentierte Schädel mit Namen DAN 5 fand sich in Gona, Äthiopien. Er gehörte zu einem graziilen *Homo erectus*, womöglich einem weiblichen Individuum.

ähnliche Überreste einer einzigen Gruppe zuzuordnen. Demgegenüber teilen die »Splitter« die Fossilfunde auf Grund anatomischer Merkmale in mehrere Arten auf. Genetisch lassen sich die Schädel- und Knochenreste nicht auswerten; jedenfalls noch nicht. Das Erbgut von *Homo erectus* ist unbekannt, weil nachweisbare Genabschnitte wegen des hohen Alters der Knochen oder einer zu warmen Fundumgebung nicht erhalten sind.

»Ich denke, es macht keinen Sinn, die unterschiedlichen Populationen des *Homo erectus* als eigene Arten zu führen«, bricht Friedemann Schrenk eine Lanze für die Lumpen. »Sie haben einen gemeinsamen Ursprung und sind durch ihre weltweit verbreitete Kultur verbunden. Das war einfach eine ungeheuer vielfältige Art, mit der höchsten Variabilität innerhalb sämtlicher Homininen.« Schrenk ist Professor für Paläobiologie der Wirbeltiere an der Goethe-Universität und Leiter der Sektion Paläoanthropologie am Forschungsinstitut Senckenberg in Frankfurt am Main.

Das Staunen über die Uneinheitlichkeit des *Homo erectus* hat sich im Jahr 2020 durch eine neue Studie allerdings weiter verstärkt: Offenbar war nicht nur die Schädelform dieser Frühmenschen sehr variabel, sondern auch ihr Verhalten – abzulesen an ihrer Werkzeugkultur. Zu dem Schluss kommt eine Forschergruppe um Sileshi Semaw vom Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH) im spanischen Burgos und Michael J. Rogers, der an der Southern Connecticut State University tätig ist.

In der Region Gona im äthiopischen Afar-Dreieck, an den Fundstellen Busidima North und Dana Auule North, stießen die Wissenschaftler auf je einen Schädelrest von *Homo erectus*: den 1,26 Millionen Jahre alten, stark fragmentierten Teil eines grobschlächtigen Schädeldachs, der nun die Fachbezeichnung BSN 12 trägt. Und einen eher graziilen, 1,5 bis 1,6 Millionen Jahre alten, fast vollständigen Hirnschädel. Die Anthropologen benannten ihn als DAN 5. Nur selten entdecken Ausgräber an ein und derselben Fundstelle Fossilien und direkt damit vermengt Steinwerkzeuge. Hier hatten die Forscher gleich bei beiden *Erectus*-Funden dieses Glück: Sowohl Busidima North als auch Dana Auule North lieferten eine reiche Ausbeute. Allerdings sind die Werkzeuge zwei unterschiedlichen Steintechnologien zuzuschreiben, dem Oldowan und dem Acheuléen. Das hätte nach der traditionellen Sichtweise nicht sein dürfen. »Eine Art – eine Technologie« lautete bisher ein Mantra der Paläoanthropologen.

Der unberechenbare Vorfahre

Bei den Oldowan- oder Mode-I-Werkzeugen handelt es sich um simple Geröllbrocken mit einer einzigen Schneidkante. Forscher ordneten sie bislang nur den frühesten Vertretern der Gattung *Homo* zu:

- ▶ *Homo rudolfensis* – er lebte von vor 2,8 bis vor 1,8 Millionen Jahren,
- ▶ *Homo habilis* – dieser Frühmensch lässt sich für die Zeit von vor 2,1 bis vor 1,5 Millionen Jahren nachweisen,
- ▶ dem frühesten afrikanischen *Homo erectus*. Er erschien vor 2 bis 1,7 Millionen Jahren auf der Weltbühne. Manche Wissenschaftler bezeichnen ihn mit dem separaten Artnamen *Homo ergaster*, dem »arbeitenden Menschen«.

Vor 1,7 Millionen Jahren, so die bisherige Vorstellung, entwickelte *Homo erectus* die fortschrittlichere Acheuléen-



COMPUTER-REKONSTRUKTION: M. PONCE DE LEÓN UND CH. ZOLLHOFFER, UNIVERSITÄT ZÜRICH

oder Mode-II-Kultur. Hierzu zählen steinerne Hackmesser und Faustkeile mit beidseitig scharfen Kanten. Wo solche Werkzeuge ans Licht kamen, deuteten Forscher sie als Hinterlassenschaft des weiterentwickelten *Homo erectus*. Stieß man hingegen auf Mode-I-Geräte, galt als gewiss, dass diese Fundstelle dem frühen *Homo* zuzuordnen war.

Aus der Gona-Region ist bisher nicht das winzigste Fossil von älteren Homininen als *Homo erectus* bekannt. Und nun das – Mode-I- und Mode-II-Werkzeuge in ein und denselben Fundschichten, mitsamt *Erectus*-Fossilien, die deutlich diesseits der 1,7-Millionen-Jahre-Zeitmarke liegen. »Die Mode-I-Technologie blieb offenbar die gesamte Altsteinzeit über in Gebrauch«, folgert Sileshi Semaw laut einer Pressemitteilung der Southern Connecticut State University. Michael J. Rogers betont: »Das widerspricht der einfachen Sichtweise, wonach einer Homininen-Spezies jeweils nur eine einzige Werkzeugtechnologie zuzuordnen ist. Die Evolutionsgeschichte des Menschen ist komplizierter.«

Homo naledi: Ein später Erectus

In einer evolutionären Sackgasse im Süden Afrikas haben Nachfahren des *Homo erectus* bis vor etwa 240 000 Jahren überlebt. Davon ist der Frankfurter Paläobiologe Friedemann Schrenk überzeugt. In einem abgelegenen Winkel Südafrikas hätten sich die Frühmenschen zum *Homo naledi* (»Mensch aus der Sternhöhle«) entwickelt. Die Skelette aus dem Rising-Star-Höhlenkomplex zeigen eine verwirrende Mischung. Schrenk listet auf: Einerseits hatten die rund 1,5 Meter großen *Naledi*-Menschen primitive Merkmale wie kleine Gehirne und Hüften, gekrümmte Fingerknochen und hochgezogene Schultern – andererseits verfügten sie über moderne, nämlich kleine und einfache Zahnkronen und moderne Hand- und Fußfunktionen. Solche vermeintlichen Rückschritte zu archaischen Zügen sind bei dauerhaft isolierten Gruppen nichts Ungewöhnliches. Die Evolution hat nie eine vorgegebene Richtung – und schon gar nicht automatisch zu einer Höherentwicklung.

FRÜHE VIELFALT Die fünf Individuen von Dmanisi in Georgien repräsentieren vermutlich einen Querschnitt durch die *Erectus*-Population vor 1,8 Millionen Jahren. Sie divergieren stark in Aussehen und Hirnvolumen.

Homo erectus, der Unberechenbare, nutzte anscheinend beide Technologien parallel. Der Frühmensch reagierte damit wahrscheinlich flexibel auf seine aktuelle Situation – je nachdem, welche Rohmaterialien rund um seinen Wohnplatz verfügbar waren und wofür er das Werkzeug brauchte. Wer etwa die zähe Haut eines verendeten Elefanten aufschneiden will, tut sich mit einem »fortschrittlichen«, beidseitig scharfkantig zugehauenen Faustkeil leichter. Geht es indes nur darum, eine hartschalige Knolle aufzubrechen, genügt ein einfacher Abschlag von Geröll aus dem nahegelegenen Flussbett und ein un bearbeiteter Hammerstein, um das faserige Innere der Knolle zu Mus zu stampfen.

Vielfalt herrscht ebenfalls bei den beiden Schädelossilien. DAN 5 ist hinreichend gut erhalten, um auf das Hirnvolumen schließen zu können: etwa 590 Kubikzentimeter. Damit ist dies der kleinste jemals in Afrika gefundene *Homo-erectus*-Schädel. BSN 12 hingegen ist viel größer und hat einen viel ausgeprägteren Überaugenwulst. »Wahrscheinlich war *Homo erectus* eine sexuell dimorphe Spezies«, nähren Semaw und Rogers einen schon von anderen Forschern gehegten Verdacht. Geschlechtsdimorphismus liegt vor, wenn männliche und weibliche Individuen derselben Art deutlich unterschiedlich aussehen. Damit sind Differenzen bezüglich Größe, Färbung oder Skelettbau gemeint. Bei Primaten ist dies sehr häufig der Fall. Allerdings: »Bis vor 15 Jahren dachten die Paläoanthropologen, *Homo erectus* sei der Erste in der Ahnenreihe des Menschen gewesen, bei dem der Sexualdimorphismus stark abgenommen hat«, sagen Semaw und Rogers. »Aber inzwischen liegen deutlich mehr Funde vor. Jetzt sieht es danach aus, dass die Geschlechter in ihrem Erscheinungsbild unterschiedlicher waren als früher vermutet.«

Die beiden Wissenschaftler erinnern an die weltberühmte Fundstelle von Dmanisi in Georgien. Dort kamen bei Grabungen seit 1991 fünf Schädel, rund 50 Skelett- und ein Hüftknochen ans Licht. Alle sind 1,8 Millionen Jahre alt und lagen auf engstem Raum beieinander. Die plausibelste Annahme dazu lautet: Diese Individuen gehörten derselben Spezies an. Umso frappierender ist daher, wie zusammen-

gewürfelt die Schädel aussehen, mit Gehirnvolumina zwischen 546 und 775 Kubikzentimetern. Im Schnitt entspricht das dem Anderthalbfachen eines heutigen Schimpansen. Die Röhrenknochen lassen auf eine Größe von 1,4 bis 1,6 Metern schließen.

Somit hatten die Dmanisi-Homininen Körpermaße am unteren Rand dessen, was man Erwachsenen der Spezies *Homo erectus* zubilligt. »Das ist entweder eine sehr frühe *Homo-erectus*-Population, die sich im Kaukasus regional weiterentwickelt hat«, sagt Paläobiologe Friedemann Schrenk, »oder *Homo rudolfensis* hat sich schon vor mehr als zwei Millionen Jahren dorthin ausgebreitet.« Diese Art hatte bereits vor dem *Homo erectus* existiert.

Egal wie viel Zeit verstreicht, ein Hominine ist immer ein möglicher Sexualpartner

Viele Forscher halten die Dmanisi-Homininen für sehr frühe Individuen von *Homo erectus*. Dann würde die plausibelste Erklärung für deren enorme Größen- und Formunterschiede lauten: Die größeren waren männlich, die kleineren weiblich. Das dürfte auch im 6000 Kilometer südlich gelegenen heutigen Äthiopien so gewesen sein, argumentieren Sileshi Semaw und Michael J. Rogers: »Das ist derzeit die einfachste Erklärung.«

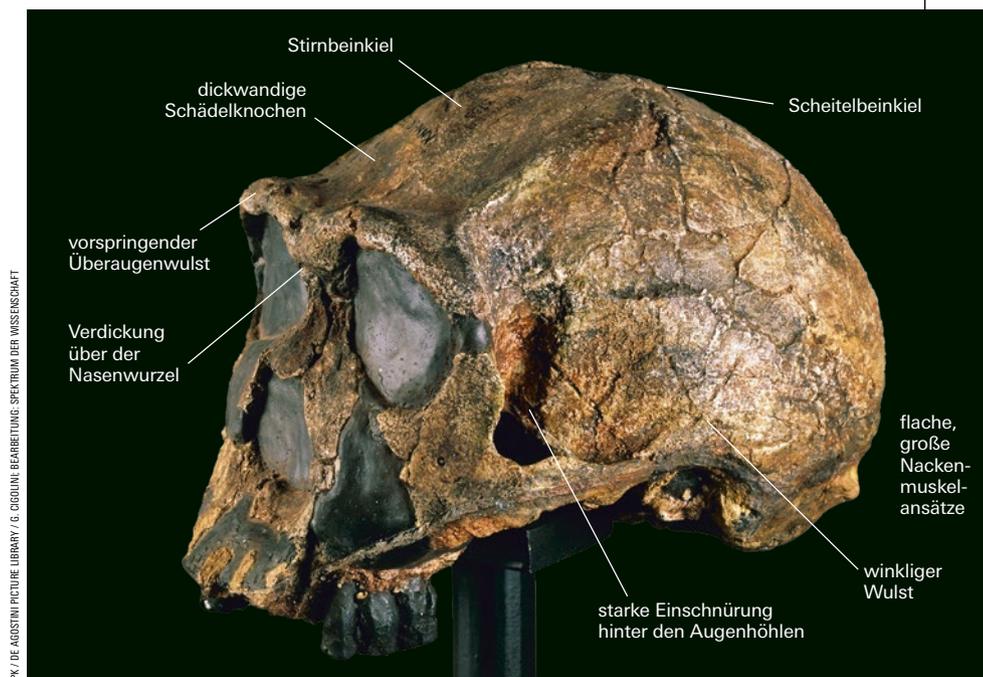
Gleichwohl räumen die beiden Forscher ein, dass dies nicht der einzige Grund für das unterschiedliche Aussehen von *Homo erectus* sein muss: »Die Gruppen waren weit verstreut, die Bevölkerungsdichte wahrscheinlich niedrig. Das begünstigte die Entwicklung regionaler anatomischer Varianten, als Folge von zeitweiser genetischer Isolation.«

Wenn Gruppen immer wieder abgeschieden voneinander leben, sie sich also nicht vermischen und damit der Genaustausch unterbrochen wird, kann das mit der Zeit zu einer hochgradig vielgestaltigen Spezies führen. Genetiker sprechen dann vom »Gründereffekt«. Was ist damit gemeint? Gerade an den Rändern einer expandierenden Population erhalten sich oft primitivere Merkmale und seltene Genvarianten. Im Stammland hingegen ist die Bevölkerung in aller Regel genetisch homogener und entwickelt Merkmale, die Anthropologen als moderner einstufen. Kommt es nach langer Isolation zu Kontakten zwischen den Gruppen, findet wieder Genfluss statt. »Selbst nach mehreren hunderttausend Jahren getrennter Entwicklung betrachten Homininen einander immer als mögliche Sexualpartner«, betonen Semaw und Rogers.

Zu solchen Kreuzungsereignissen ist es im Verlauf der Menschheitsgeschichte immer wieder gekommen. Genetiker haben im zurückliegenden Jahrzehnt Einsprengsel der Neandertaler und der Denisovaner im Erbgut heute lebender Menschen nachgewiesen, die von Vermischungen vor 45000 bis 65000 Jahren stammen. Etwa 400000 Jahre zurückreichende Kreuzungsspuren anderer Art haben Genetiker um Kay Prüfer und Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig 2013 identifiziert. Es handelt sich um DNA-Bausteine von sehr archaischen Homininen, die sich vor mehr als einer Million Jahre von den gemeinsamen Vorfahren des modernen Menschen, des Neandertalers und des Denisovaners abgespalten hatten. Als wahrscheinlichster Kandidat dafür gilt eine der Populationen von *Homo erectus*. Denisovaner,

Wann ist ein *Homo erectus* ein *Homo erectus*?

Paläoanthropologen ordnen Fossilfunde meist anhand von anatomischen Merkmalen einer bestimmten Spezies zu. Am rund 1,6 Millionen Jahre alten Schädel KNM-ER 3733 aus der Fundregion Koobi Fora in Kenia sind charakteristische Merkmale von *Homo erectus* zu sehen. Allerdings gibt es vergleichbar alte fossile Schädel aus Afrika, die ähnlich aussehen, aber beispielsweise einen viel weiter vorspringenden Überaugenwulst aufweisen. Eine separate Frühmenschenart? Vermutlich handelt es sich um Geschlechtsdimorphismus: Der grazile Schädel KNM-ER 3733 gehörte wohl zu einem weiblichen Individuum.



Neandertaler und anatomisch moderne Menschen waren letztlich allesamt Nachfahren von *Homo erectus*.

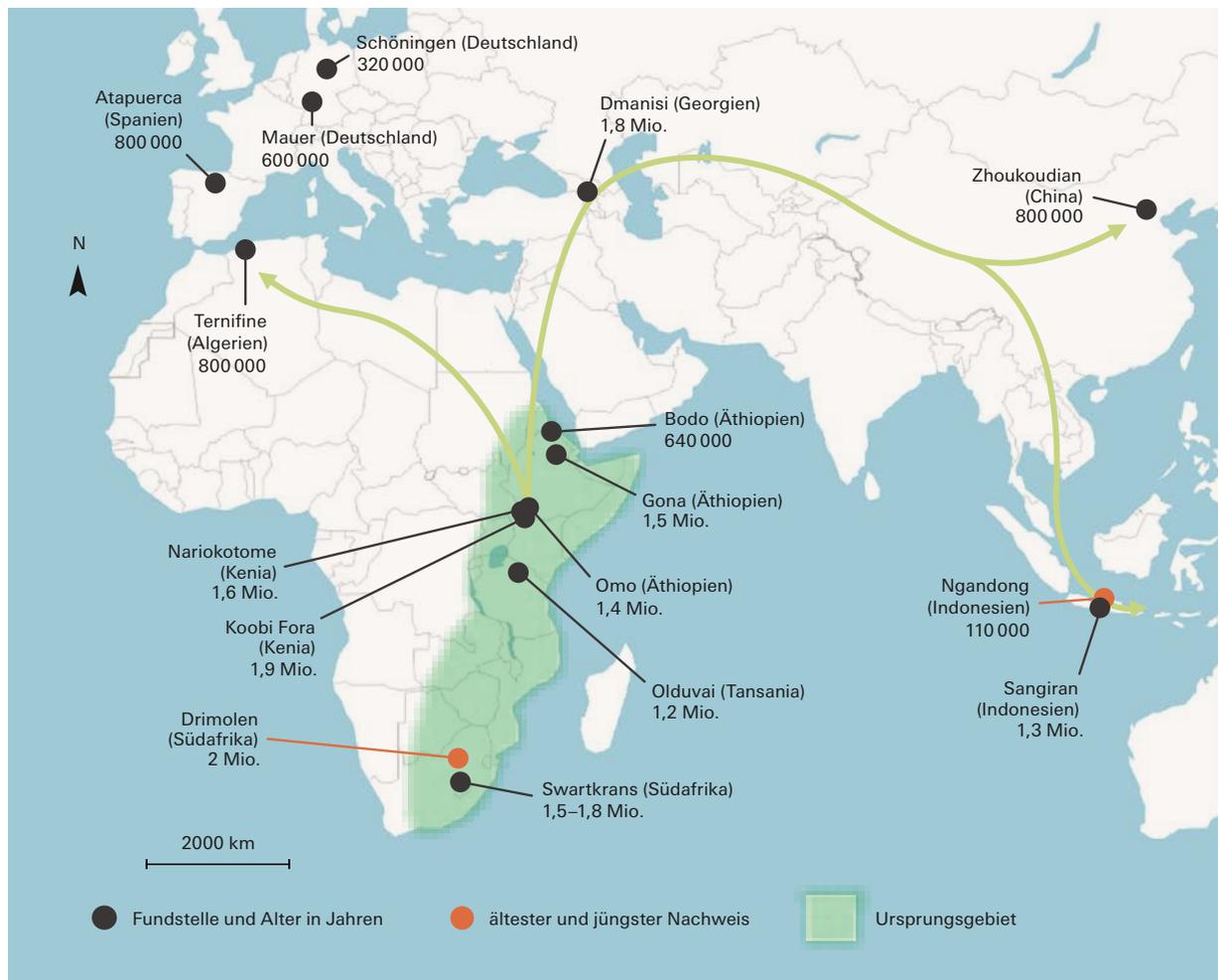
Weitere Hinweise verdichten das Bild einer Gattung *Homo*, die im Lauf ihrer Entwicklung immer wieder mit so genannten Superarchaics sexuelle Kontakte hatte. Diese sehr frühen »ghost populations« sind ausschließlich genetisch fassbar, das heißt, ihnen lassen sich noch keine Fossilien zuordnen. Im Februar 2020 veröffentlichte der Populationsgenetiker Alan R. Rogers von der University of Utah molekulargenetische Indizien, wonach die gemeinsamen Vorfahren von Neandertalern und Denisovanern sich vor etwa 700 000 Jahren mit einer superarchaischen Menschenform kreuzten – wahrscheinlich irgendwo in Eurasien. Er schätzt, dass sich die beiden Linien zu diesem Zeitpunkt bereits 1,2 Millionen Jahre lang getrennt voneinander entwickelt hatten. Die superarchaische Population stammte womöglich von den Erstankömmlingen in Eurasien ab.

Ebenfalls im Februar 2020 berichteten die Genetiker Arun Durvasula und Sriram Sankararaman von der University of California in Los Angeles, sie seien bei einigen westafrikanischen Bevölkerungen – etwa den Yoruba in Nigeria und den Mende in Sierra Leone – auf extrem alte DNA-Varianten gestoßen. Diese gehen auf eine Vermischung mit einer sehr ursprünglichen Homininenform zurück, so die Vermutung der Forscher. Sie errechneten, dass jene Linie sich vor rund einer Million Jahren von den Vorfahren des modernen *Homo sapiens* abgespalten habe. Beide Male liegt es wieder nahe, auf Kreuzungen mit *Homo-erectus*-Populationen beziehungsweise Mischbevölkerungen zu schließen – im ersten Fall mit einer eurasischen Gruppe, im zweiten Fall mit einer afrikanischen.

Eine biologische Spezies ist eine geschlossene Fortpflanzungsgemeinschaft, deren Mitglieder miteinander fruchtbare Nachkommen zeugen können. Von anderen Arten ist

Die ersten Weltbürger

Homo erectus war vermutlich die erste Menschenform, die Afrika verließ und sich über weite Bereiche Europas und Asiens ausbreitete. Die Karte zeigt eine Auswahl wichtiger Fundstellen.





MICHAEL J. ROGERS, SOUTHERN CONNECTICUT STATE UNIVERSITY

OLDOWAN-WERKZEUGE Die beiden Steingeräte (a), die jeweils von zwei Seiten abgelist wurden, stammen vom Fundort Dana Aoule North in der Region Gona in Äthiopien. Sie sind nicht älter als 1,6 Millionen Jahre.

ACHEULÉEN-WERKZEUGE Auch diese Geräte (b) fanden sich am Fundplatz Dana Aoule North. Sie zählen zur Steintechnologie des Acheuléen und sind fortschrittlicher gestaltet als die Oldowan-Werkzeuge. Alle Artefakte sind aber ungefähr gleich alt.

diese Gemeinschaft durch eine Artengrenze getrennt. So lautet die traditionelle Definition für eine Spezies. Bei den Homininen konnte sich aber anscheinend selbst nach Äonen der geografischen Isolation jeder mit jedem kreuzen. Wie sinnvoll ist es da noch, Etiketten mit Namen à la »Homo XY« auf Knochen zu kleben?

Tatsächlich schwimmt der herkömmliche Artbegriff mehr und mehr ins Nebulöse. Jean-Jacques Hublin, Direktor am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, kennt dieses Dilemma zur Genüge. Schon 2014 schrieb er mit Blick auf *Homo erectus*: »Das ist die Herausforderung für die Paläoanthropologen. Sie versuchen, phänotypisch (anhand ihres äußeren Erscheinungsbilds) unterschiedlichen Populationen durch Zeit und Raum zu folgen, noch bevor sie schließlich zu separaten Arten werden.« Wie der biologische Artbegriff habe auch das Konzept der paläontologischen Art – die Definition zusammengehöriger Gruppen auf Grund von gemeinsamen morphologischen oder genetischen Merkmalen – offensichtlich Grenzen, räumt der Leipziger Wissenschaftler ein. »Aber ich sehe gegenwärtig keinen anderen Weg, mit den Fossilien umzugehen. Wir sollten uns lediglich immer bewusst sein, dass wir nie mehr als einen kleinen Ausschnitt

aus der einstigen Vielfalt des Lebens sehen«, unterstreicht Hublin.

Und er hat ein Trostwort für alle bereit, die sich auch künftig mit dem so vielgestaltigen *Homo erectus* herum-schlagen wollen: »Die Natur hat es denen, die werdenden Spezies mitten in ihrer Entwicklung zusehen wollen, nun mal nicht leicht gemacht.« ◀

QUELLEN

- Durvasula, A. et al.:** Recovering signals of ghost archaic introgression in African populations. *Science Advances* 6, 2020
- Herries, A.I.R. et al.:** Contemporaneity of Australopithecus, Paranthropus and early *Homo erectus*. *Science* 368, 2020
- Hublin, J.-J.:** Paleoanthropology: *Homo erectus* and the limits of a paleontological species. *Current Biology* 24, 2014
- Rizal, Y. et al.:** Last appearance of *Homo erectus* at Ngandong, Java, 117,000–108,000 years ago. *Nature* 577, 2019
- Rogers, A. R. et al.:** Neanderthal-Denisovan ancestors interbred with a distantly related hominin. *Science Advances* 6, 2020
- Semaw, S. et al.:** Co-occurrence of Acheulian and Oldowan artifacts with *Homo erectus* cranial fossils from Gona, Afar, Ethiopia. *Science Advances* 6, 2020

COVID-19 IMMUNABWEHR IM CHAOS

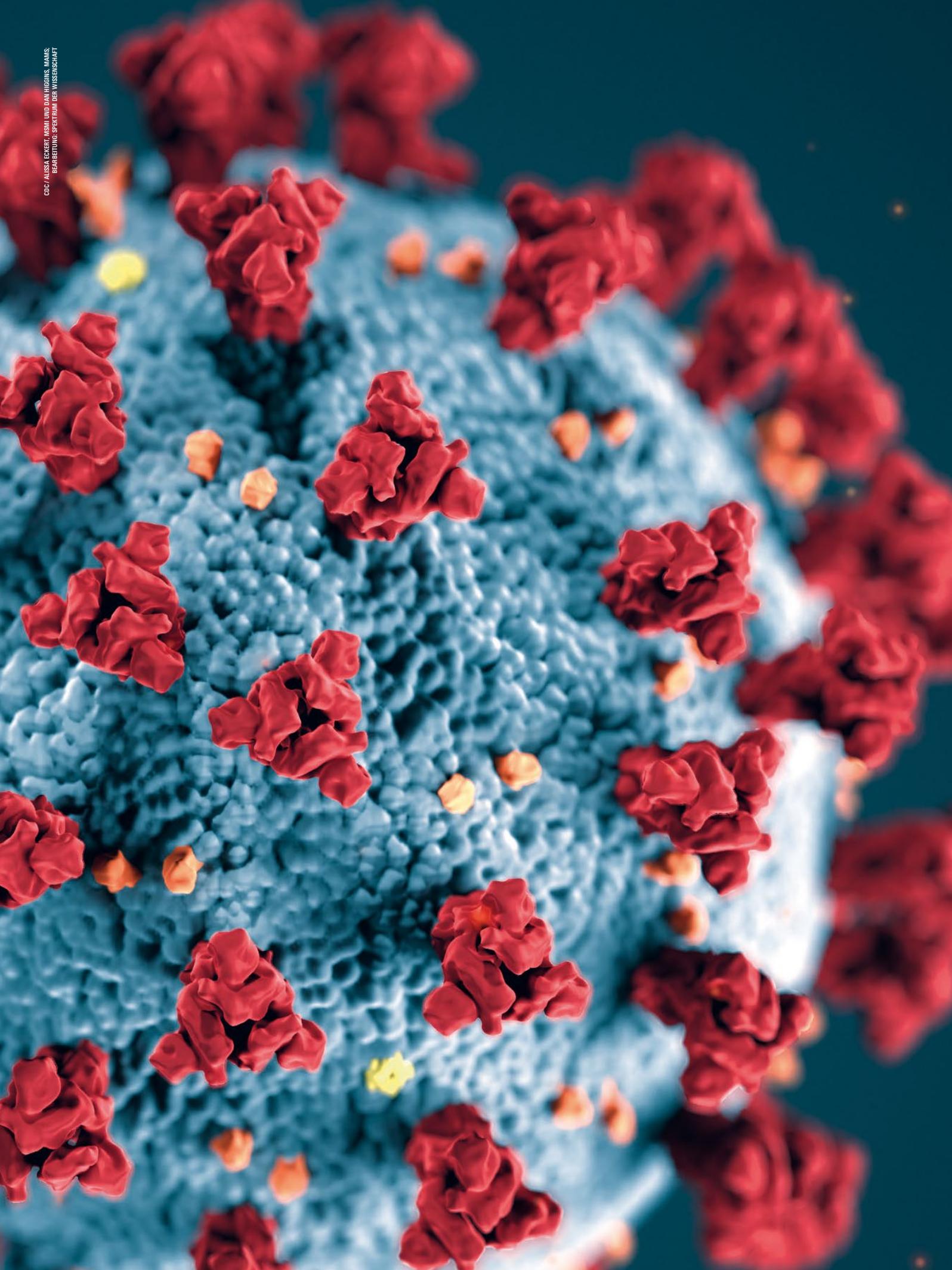
Das neue Coronavirus Sars-CoV-2 kann die Abwehrsysteme unseres Körpers massiv durcheinanderbringen. Sowohl die angeborene als auch die adaptive Immunantwort laufen dabei aus dem Ruder – oft mit tödlichen Folgen.



Akiko Iwasaki ist Professorin an den Abteilungen für Immunologie und für molekulare Zell- und Entwicklungsbiologie der Yale University, New Haven (USA). Zudem forscht sie am Howard Hughes Medical Institute in Maryland, USA. **Patrick Wong** gehört zu ihren wissenschaftlichen Mitarbeitern an der Yale University.

» spektrum.de/artikel/1823138

VERHEERENDE BILANZ Das Virus Sars-CoV-2, hier in einer Illustration, hat binnen eines Jahres weltweit mehr als zwei Millionen Menschen getötet und zahllose weitere mit bleibenden Gesundheitsschäden zurückgelassen.



Die ersten dokumentierten Covid-19-Patienten wurden am 16. Dezember 2019 in ein Krankenhaus im chinesischen Wuhan eingeliefert; mehrere von ihnen starben. Da bereitete der neue Erreger noch kaum jemandem in den westlichen Ländern wirklich Sorgen – China schien weit weg zu sein. Doch schon damals hätte man klüger sein können in Anbetracht dessen, dass gefährliche Coronaviren bei vorangegangenen Ausbrüchen stets mehrere Kontinente erfasst hatten: Sars-CoV in den Jahren 2002/2003 und Mers-CoV ab 2013. Sars steht dabei für »Severe Acute Respiratory Syndrome«, Mers bedeutet »Middle East Respiratory Syndrome«, CoV heißt »Corona-Virus«.

Auch Sars-CoV-2, der Erreger von Covid-19, ließ sich von kontinentalen Grenzen nicht aufhalten. Als dieser Artikel entstand, hatten sich weltweit rund 100 Millionen Menschen angesteckt und mehr als zwei Millionen waren daran gestorben.

Von Anfang an versuchten Mediziner und Wissenschaftler, gemeinsam die neue Gefahr einzudämmen. Rund um den Globus bündelten sie ihre Kräfte in Forschungsinitiativen. Die Zusammenarbeit hat in weniger als einem Jahr beispiellose Erkenntnisse darüber erbracht, worum es sich bei dem neuen Coronavirus handelt und wie es auf den menschlichen Organismus wirkt. Wir beginnen nun zu verstehen, warum eine Infektion mit Sars-CoV-2 zu sehr unterschiedlichen Krankheitsverläufen führen kann. Einige Menschen zeigen überhaupt keine Symptome, andere entwickeln Husten oder Fieber. Und manche Patienten, leider nicht wenige, erfahren lebensbedrohliche Komplikationen – allen voran akutes Lungenversagen (»Acute Respiratory Distress Syndrome«, ARDS).

Forscher wissen jetzt: Das neue Virus kann, ähnlich wie Sars-CoV und Mers-CoV, das Immunsystem zu Fehlreaktionen provozieren. Daraus folgen entzündliche Prozesse, die ARDS und weitere gefährliche Symptome hervorrufen. Der Blutspiegel von Botenstoffen und Entzündungsmarkern, die an der Körperabwehr mitwirken – etwa IL-6, TNF-alpha und CRP –, steigt bei schwer kranken Patienten stark an. Mediziner behandeln die Betroffenen oft erfolgreich mit entzündungshemmenden Arzneistoffen wie Dexamethason und Prednison, ein Beleg dafür, dass es bei bedrohlichen Krankheitsverläufen zu einer überschießenden Immunantwort kommt. Dieselben Arzneien hatten bereits gegen Infektionen mit früheren Coronaviren gewirkt.

Komplikationen im ganzen Organismus

Mittlerweile ist klar, dass bei manchen Covid-Patienten eine ungezügelter Abwehrreaktion anläuft, die Schäden im gesamten Körper anrichtet – von Blutgerinnseln und Kreislaufkomplikationen, Herzschäden, Nierenversagen, Lungenentzündung und -kollaps bis hin zur Sepsis. Die schwersten Fälle erfordern eine intensivmedizinische Behandlung im Krankenhaus. Entzündungshemmende Kortikosteroide zu geben, reicht bei kritischen Verläufen nicht aus: Diese Patienten benötigen starke Eingriffe wie künstliche Beatmung. Ärzte brauchen dringend Schnelltests, mit denen sich Gewebeproben auf Biomarker hin untersuchen lassen, die den weiteren Krankheitsverlauf vorhersagen helfen. Wichtig ist vor allem zu wissen, wie wahrscheinlich es ist,

ob eine infizierte Person lebensbedrohliche Symptome ausprägen wird.

Biomarker-Tests und effektive Behandlungen zu entwickeln, erfordert ein tief gehendes Verständnis davon, wie Sars-CoV-2 mit Körperzellen interagiert und wie das Immunsystem darauf antwortet. Gemeinsam mit vielen anderen Wissenschaftlern haben wir Anfang 2020 begonnen, die immunologischen Fehlreaktionen zu untersuchen, die schweren Covid-19-Verläufen zu Grunde liegen. Wir wussten schon vorher, dass die Körperabwehr eine komplizierte Abfolge von Ereignissen losstritt, wenn Krankheitserreger eindringen. Erfolgt einer dieser Schritte zur falschen Zeit, kann das zu überschießenden Entzündungsreaktionen führen, die das körpereigene Gewebe schädigen.

Das Immunsystem antwortet auf zweierlei Weise auf Krankheitserreger. Erstens mit einer schnellen Reaktion, zweitens mit einem langsamen, aber dauerhaften Mechanismus. Die so genannte angeborene Immunantwort nimmt die erste Aufgabe wahr. Ihre Abwehrzellen verfügen über Rezeptoren, mit denen sie eindringende Krankheitskeime erkennen, woraufhin sie mit Hilfe bestimmter Proteine, der Zytokine, eine Signalkette in Gang setzen. Die Zytokine warnen den Organismus vor der Gefahr, so dass er sich verteidigt, etwa indem er infizierte Körperzellen abtötet.

WETTLAUF MIT DEM ERREGER Forschergruppen auf der ganzen Welt haben sich dem Kampf gegen Covid-19 verschrieben – etwa, indem sie Impfstoffe in Rekordzeit entwickeln.



Zellen der angeborenen Immunantwort rufen zudem bestimmte weiße Blutkörperchen herbei, die zum »adaptiven Immunsystem« gehören. Diese zweite Abwehrfront dient dazu, eine spezifische und dauerhafte Immunität gegen Krankheitserreger aufzubauen. Die weißen Blutkörperchen stoßen Prozesse an, die binnen ein bis zwei Wochen dazu führen, dass Antikörper und T-Zellen im Organismus patrouillieren und den jeweiligen Erreger gezielt unschädlich machen.

Die angeborene Immunantwort tut bei den meisten Covid-19-Patienten das, was sie tun soll, indem sie Sars-CoV-2 eindämmt beziehungsweise eliminiert. Bei ungefähr jedem 20. Betroffenen allerdings läuft sie aus dem Ruder, und ihre Abwehrzellen erzeugen zu viele Zytokine. Deren Überproduktion ähnelt einem »Zytokinsturm«, wie er von anderen medizinischen Notfällen her bekannt ist, und Mediziner nahmen früher an, dass dies zu einem kritischen Krankheitsverlauf beitrage. Laut neueren Forschungsergebnissen unterscheiden sich die Immunmechanismen schwerer Covid-Fälle jedoch meist von denen eines Zytokinsturms; nichtsdestoweniger sind sie für den Patienten gefährlich. Sie können zum akuten Lungenversagen führen und bleibende Schäden in der Lunge und anderen Organen anrichten. Ebenso können sie den Organismus dazu veranlassen, Fibrin zu produzieren – ein Protein, das Blutgerinnsel begünstigt. Darüber hinaus bewirken sie in manchen Fällen, dass Flüssigkeit aus den Blutgefäßen austritt und in die Lungenbläschen sickert, was Atemprobleme und Luftnot nach sich zieht.

Viren nutzen die molekulare Zellmaschinerie, um sich zu vermehren. Ein Mechanismus der angeborenen Immunantwort, der dem entgegenwirkt, scheint bei Sars-CoV-2 zu versagen. Er beruht auf bestimmten Zytokinen namens Interferone, die den viralen Vermehrungszyklus in Zellen blockieren. Indem das Immunsystem die Produktion von alpha-Interferon rasch hochfährt, kann es eindringende Viren unter Kontrolle bringen und das Fortschreiten einer Infektion zu einer schweren Erkrankung verhindern. Gemäß einiger Studien setzt aber bei Älteren oder bei Patienten, die sehr vielen Sars-CoV-2-Partikeln ausgesetzt waren, die Herstellung des Proteins mitunter verzögert ein, so dass sich der Erreger weiter stark vervielfältigt. Daneben können die Interferon-Moleküle, wenn sie endlich doch am Zielort eintreffen, eine Überreaktion auslösen mit der Ausschüttung großer Mengen verschiedener Zytokine, was Entzündungsreaktionen und schwere Krankheitssymptome begünstigt. Die Interferon-Reaktion des Organismus zu beobachten, liefert somit wichtige Hinweise darauf, ob einem Covid-19-Patienten lebensbedrohliche Komplikationen drohen und wie die Infektion am besten zu behandeln ist.

Hierbei erscheint jedoch vieles noch unklar. Das Virus könnte bei kritischem Krankheitsverlauf die Fähigkeit beeinträchtigen, Interferone zu bilden – entweder generell oder nur bei bestimmten genetischen Voraussetzungen. Es könnte auch sein, dass der Organismus Antikörper gegen alpha-Interferon bildet. Weltweit untersuchen zahlreiche Forscher, darunter wir, die Existenz solcher »Auto-Antikörper« als mögliche Ursache für lang anhaltende Covid-19-Symptome. Betroffene Patienten könnten davon profitie-

AUF EINEN BLICK ABWEHR AUSSER KONTROLLE

- 1 Die virale Erkrankung Covid-19 verläuft bei einigen Betroffenen schwer bis lebensbedrohlich.
- 2 Das Virus provoziert bei diesen Patienten eine überschießende Reaktion des Immunsystems.
- 3 Entzündliche Prozesse, Gefäßverschlüsse und Gewebeschäden können bei Covid-19 zahlreiche Organe betreffen und lang anhaltende Gesundheitsprobleme verursachen.

ren, Infusionen mit künstlich hergestelltem Interferon zu erhalten – ein Ansatz, der bereits in klinischen Studien untersucht wird. Auto-Antikörper nachzuweisen, könnte weiterhin vorhersagen helfen, ob sich der Zustand eines Patienten verschlechtern wird.

Zytokinstürme waren schon bei Infektionen mit früheren Coronaviren wie Sars-CoV und Mers-CoV aufgetreten. Daher lag die Vermutung nahe, dass Sars-CoV-2 sie ebenfalls auslöst. Tatsächlich stellten Ärzte bereits kurz nach Beginn der Pandemie fest: Patienten mit einem besonders hohen Risiko für akutes Lungenversagen fallen durch erhöhte Werte von Zytokinen auf, die mit Entzündungen in Zusammenhang stehen. Manche dieser Proteine, etwa IL-6, TNF-alpha, IL-1-beta und IL-12, verstärken entzündliche Prozesse und Gewebeschäden. Diane Marie Del Valle von der Icahn School of Medicine at Mount Sinai, New York, und ihr Team haben deutlich erhöhte Konzentrationen solcher Moleküle im Blut von fast 1500 Patienten gemessen. Laut den Ergebnissen lässt sich bei abnorm hohen Blutspiegeln von IL-6 und TNF-alpha recht zuverlässig prognostizieren, dass die Krankheit einen schweren, lebensbedrohlichen Verlauf nehmen wird.

Die Virenattacke bringt den Körper dazu, sich gegen Pilze und Parasiten zu wehren

Die gleichen Zusammenhänge sahen wir bei unseren Patienten. Manche Betroffene zeigten aber auch ziemlich ungewöhnliche Reaktionen. Unter anderem beobachteten wir steigende Werte von IL-5 und IL-17 – das sind Zytokine, die üblicherweise nicht mit antiviralen Immunreaktionen in Verbindung stehen. Stattdessen stoßen sie eine offensichtlich fehlgeleitete Immunantwort an: eine, die sich besser zum Abwehren von Parasiten und Pilzen eignet. Wir müssen noch herausfinden, ob das seinerseits Gewebeschäden verursacht oder ob es Ressourcen verschlingt, die der Körper eigentlich zum Bekämpfen des Virus benötigt.

Bei einigen Covid-Patienten fanden wir zudem erhöhte Spiegel von Chemokinen, einer Unterklasse der Zytokine, die Immunzellen dorthin leiten, wo der Organismus sie braucht. Hohe Konzentrationen der Chemokine CCL2, CCL7, CXCL9 und IL-8 an den Orten des Infektionsgeschehens

wirkten wie ein Signal zum Versammeln der Truppen. Nicht nur, dass Zytokine und andere Signalstoffe des Immunsystems dort am Entstehen lokaler Gewebeschäden mitwirken können; die Chemokine rufen darüber hinaus diverse Abwehrzellen herbei, damit sie sich dem Kampf anschließen.

Um zu ermitteln, was die Gewebeschäden verursacht, gingen wir dazu über, Zellen im Blut und in der Lunge von

Betroffenen zu untersuchen. Eine spezielle Technik, die so genannte Durchflusszytometrie, erlaubt es, gezielt ganz bestimmte Zellen im Blut mit fluoreszierenden Antikörpern zu kennzeichnen. Damit wiesen wir nach, dass sich die Populationen verschiedener Immunzellen, die im Blut zirkulieren, bei Covid-19-Patienten beträchtlich verändern können. Auf zwei Zelltypen des angeborenen Immunsystems

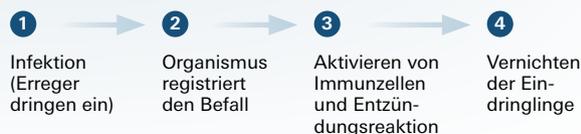
Wie Covid-19 das Immunsystem untergräbt

Sars-CoV-2, der Erreger der Krankheit Covid-19, ist sehr effektiv darin, die Körperabwehr mit all ihren Immunzellen, Signalstoffen und Antikörpern zu irritieren. Das Virus verursacht bei vielen Patienten schwere Entzündungen, die das Körpergewebe zerstören – nicht nur in der Lunge, sondern im gesamten Organismus. Sars-CoV-2 schaltet zudem auf bisher unbekannte Weise T-Lymphozyten aus, die infizierte Zellen abtöten könnten. Weltweit arbeiten Forscher daran, Therapien zu entwickeln, um die normale antivirale Funktion des Immunsystems wiederherzustellen.

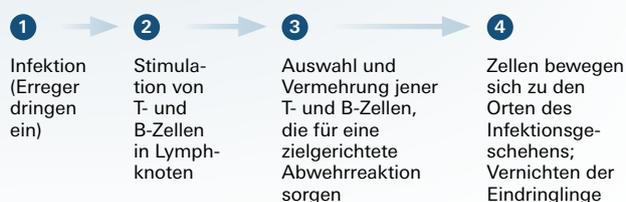
Schnelle und langsame Verteidigung

Auf eindringende Krankheitserreger reagiert das Immunsystem sofort – und es baut darüber hinaus einen lang anhaltenden Abwehrmechanismus gegen sie auf. Permanent einsatzbereite Zellen und Signalsysteme schlagen bei einer Infektion rasch Alarm, um unverzüglich Abwehrkräfte zu mobilisieren und die Eindringlinge zu vernichten. Später, binnen einer oder zweier Wochen, vermehren sich weiße Blutkörperchen wie T-Lymphozyten und Antikörper bildende B-Zellen, die deutlich gezielter gegen die Erreger vorgehen. Sie sorgen für eine dauerhafte Immunität gegenüber dem jeweiligen Keim, so dass der Organismus gewappnet ist, falls es künftig zu einer erneuten Infektion kommt.

Angeborene Immunantwort (schnell)



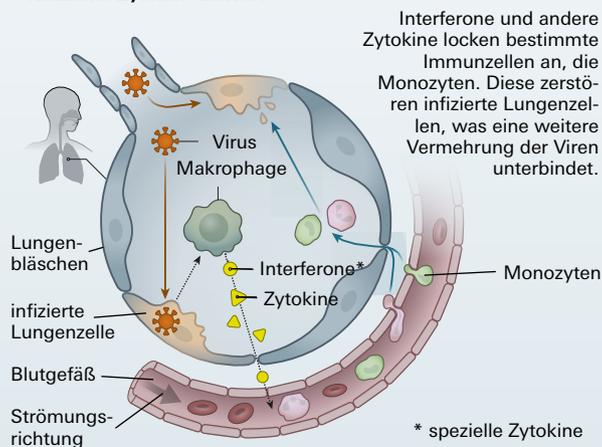
Adaptive Immunantwort (langsam)



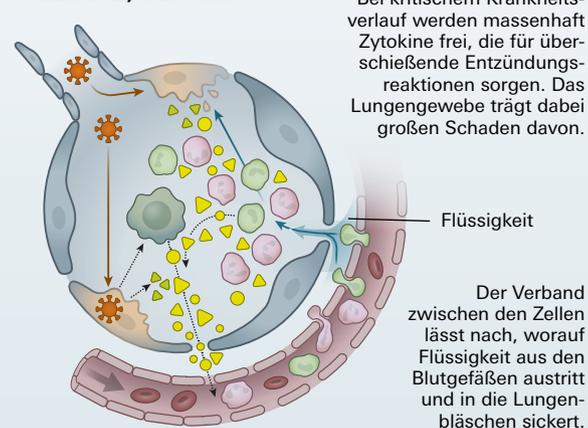
Überschießende Entzündungsreaktionen der angeborenen Immunantwort

Funktioniert das angeborene Immunsystem so, wie es soll, entschärft und vernichtet es die eindringenden Sars-CoV-2-Viren. Doch der Erreger kann die Körperabwehr zu überschießenden Reaktionen provozieren. Ein Übermaß an Signalproteinen namens Zytokinen überschwemmt dann den Infektionsherd, so dass beispielsweise Entzündungen in der Lunge aufflammen, die das Gewebe massiv schädigen. Aus nahe gelegenen Blutgefäßen tritt Flüssigkeit aus und sickert in die Lungenbläschen.

Nützliche Zytokin-Antwort



Schädliche Zytokin-Antwort



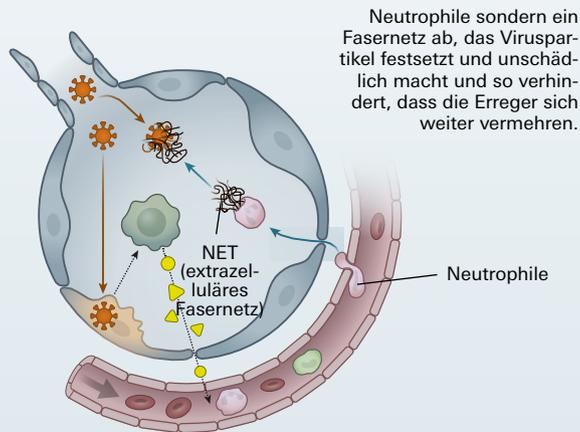
tems traf das besonders stark zu, nämlich auf Monozyten und Neutrophile. Bei gesunden Personen stellen diese etwa zehn beziehungsweise weniger als ein Prozent der »mononukleären Zellen des peripheren Bluts«, von denen viele eine bedeutsame Rolle im Immungeschehen spielen. Bei Covid-19-Patienten betragen die jeweiligen Anteile mitunter 30 beziehungsweise 10 Prozent.

Als Akteure der angeborenen Immunantwort patrouillieren Monozyten in den Blutgefäßen durch den Organismus und sind als Erste vor Ort, um Krankheitserreger zu eliminieren oder zu isolieren. Nehmen sie mikrobielle Eindringlinge wahr, reagieren sie oft darauf, indem sie sich in Makrophagen und dendritische Zellen differenzieren, spezielle Unterarten der weißen Blutkörperchen. Dendritische Zellen

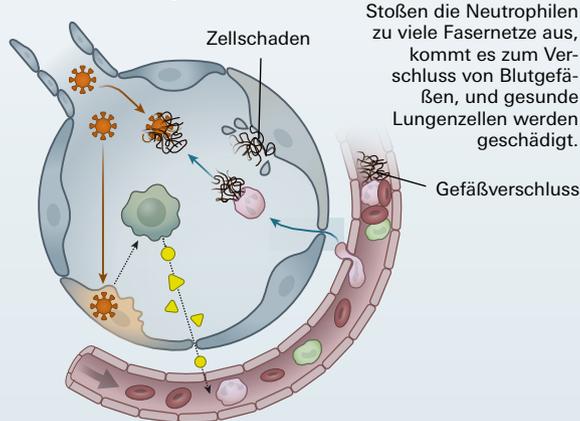
Kollateralschäden durch Mikrobenfallen

Eine Untergruppe der weißen Blutkörperchen, die so genannten Neutrophilen, vermehrt sich im Blut einiger Covid-19-Patienten übermäßig stark. Diese Immunzellen dienen normalerweise der Zerstörung von Mikroorganismen, können aber auch dem Körper selbst schaden. Ihre Menge im Blut hilft vorherzusagen, wie die Krankheit fortschreiten wird. Neutrophile stoßen Netze extrazellulärer Fasern aus, so genannte »neutrophil extracellular traps« (NET), die Viren und weitere Erreger einfangen und abtöten. Bei schweren Entzündungsreaktionen können NET Gefäßverschlüsse verursachen und Lungenzellen in Mitleidenschaft ziehen.

Nützliche Wirkung von NET



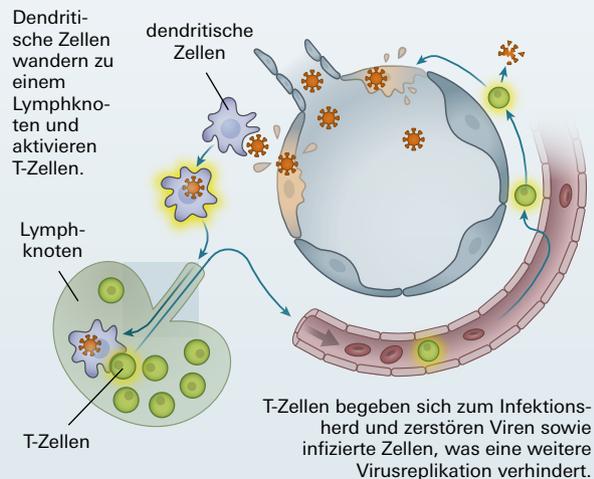
Schädliche Wirkung von NET



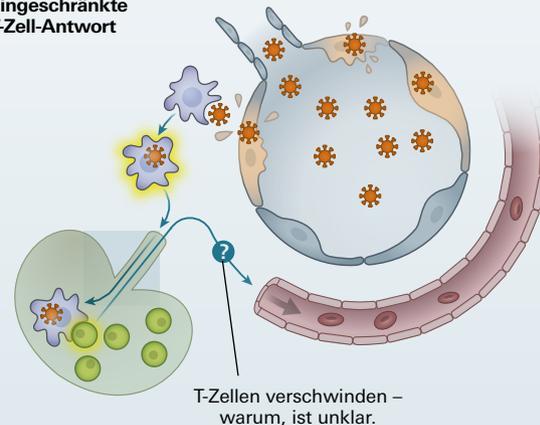
Verlust von T-Lymphozyten

Die adaptive Immunantwort umfasst unter anderem T-Lymphozyten, die sich infolge der Virusinfektion im Körper entwickeln. Sie durchlaufen einen Auswahlprozess und können anschließend – also einige Zeit nach der Erstinfektion – die Erreger erkennen und gezielt bekämpfen. Die T-Zellen wandern von den Lymphknoten zu den Orten des Infektionsgeschehens, nachdem sie von dendritischen Zellen (einer weiteren Untergruppe der weißen Blutkörperchen) aktiviert worden sind. Bei einer schwer verlaufenden Covid-19-Erkrankung ist die Zahl der T-Lymphozyten im Blut, die das Virus einzudämmen in der Lage sind, stark vermindert – aus noch unbekanntem Grund.

Nützliche T-Zell-Antwort



Eingeschränkte T-Zell-Antwort



erkennen und markieren Krankheitskeime, so dass andere Immunzellen dagegen vorgehen können.

Um sicherzustellen, dass die Körperabwehr nicht überreagiert, reguliert der Organismus die Zahl der Monozyten normalerweise streng. Doch diese Kontrolle geht bei schweren Covid-Fällen verloren, und es wandern zahlreiche Monozyten und Makrophagen in die Lunge ein. Als Mediziner um Mingfeng Liao vom Nationalen Klinischen Forschungszentrum für Infektionskrankheiten in Shenzhen, China, die Lungen stark erkrankter Covid-Patienten untersuchten und Zellproben aus den unteren Atemwegen entnahmen, fanden sie eine Flut von Monozyten und Makrophagen. Beide Zelltypen stellten Zytokine in einer Menge her, die für heftige Entzündungsreaktionen typisch ist. Durch das Hemmen entzündlicher Prozesse lässt sich somit möglicherweise ein kritischer Krankheitsverlauf verhindern.

Falls Zytokine tatsächlich zu den Haupttreibern schwerer Covid-Verläufe gehören, sollte es therapeutisch von Vorteil sein, die Aktivität dieser Proteine zu drosseln. Es gibt Arzneistoffe, die das tun. Beispielsweise richtet sich der Antikörper Tocilizumab gegen einen Zellrezeptor, an den das Zytokin Interleukin-6 andockt. Tocilizumab verhindert die Bindung des Zytokins an den Rezeptor und dämpft so Entzündungsreaktionen. Üblicherweise dient der Arzneistoff zur Behandlung rheumatischer Erkrankungen. Leider hat er in den bisherigen klinischen Studien kaum dazu beigetragen, die Prognose von Covid-Patienten zu verbessern. Immer mehr Wissenschaftler und Ärzte fragen sich daher, ob die überschießenden Entzündungsreaktionen womöglich nicht nur auf Zytokinen beruhen.

Fatales Zusammenspiel von Molekülen triggert Herz-Kreislauf- und Lungenprobleme

Von Bedeutung könnte hier ein Peptidhormon namens Bradykinin sein. Der Molekularbiologe Michael R. Garvin vom Oak Ridge National Laboratory in Tennessee, USA, und seine Kollegen haben Lungenflüssigkeit von Patienten analysiert und vermuten angesichts der Ergebnisse, dass Bradykinin ähnlich wie Zytokine eine Entzündungsreaktion auszulösen vermag. Entsprechende »Bradykinin-Stürme« werden von entzündungsfördernden Zytokinen möglicherweise aber noch verschlimmert. Im Übermaß kann Bradykinin die Blutgefäße stark erweitern und bedrohliche Symptome herbeiführen, wie sie bei schweren Covid-Fällen auftreten – beispielsweise Herzrhythmusstörungen und plötzlichen Herzstillstand auf Grund eines gestörten Haushalts von Elektrolyten, die für die Herz-Kreislauf-Funktion wichtig sind. Garvin und sein Team stellten bei schwer kranken Betroffenen zudem eine massiv gesteigerte Produktion von Hyaluronsäure fest. Aggregate dieses Moleküls binden viel Wasser. Untersuchungen an verstorbenen Patienten haben gezeigt, dass solche Faktoren mitunter fatal zusammenwirken und, gemeinsam mit dem Austritt von Flüssigkeit aus den Blutgefäßen, tödliche Lungenkomplikationen verursachen.

Inwieweit Bradykinin an Covid-19 beteiligt ist, bedarf weiterer Klärung. Die dosisabhängige Wirkung des Peptidhormons direkt zu messen, ist sehr schwierig. Aber Versuche mit dem Arzneistoff Icatibant, der den Rezeptor von

Bradykinin hemmt, stützen die These, wonach niedrigere Spiegel des Peptids mit einem günstigeren Krankheitsverlauf einhergehen.

Bradykinin spielt noch in einem weiteren einschlägigen Entzündungsprozess eine Rolle. Eine Untergruppe der weißen Blutkörperchen, die bereits genannten Neutrophilen, die Krankheitserreger auf verschiedene Weise bekämpfen, können die Bradykinin-Produktion ankurbeln. Mehrere Forschergruppen einschließlich unserer eigenen haben festgestellt, dass Neutrophile im Blut von Covid-Patienten manchmal sehr zahlreich zirkulieren. Das Zytokin IL-8 wirkt an ihrer Vermehrung mit und leitet sie zu den Stellen des Infektionsgeschehens. Wenn sich bei Erkrankten schon am ersten Tag des Klinikaufenthalts eine hohe Zahl von Neutrophilen nachweisen lässt, ist das ein sicherer Hinweis darauf, dass die Betroffenen später auf die Intensivstation müssen. Jüngere Arbeiten lassen erkennen, warum sich Neutrophile bei Covid-19 nachteilig auswirken. Diese Zellen stoßen Netze aus extrazellulären Fasern aus, so genannte »neutrophil extracellular traps« (NET), die aus DNA, antimikrobiellen Proteinen und Enzymen bestehen und in der Lage sind, Erreger einzufangen und abzutöten. Leider schädigen NET mitunter gesundes Körpergewebe.

Moritz Leppkes von der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und seine Kollegen haben Lungengewebeproben verstorbener Covid-Patienten untersucht und dabei auffällige Verstopfungen kleiner Blutgefäße durch verklumpte NET entdeckt. Die Forscher wiesen NET weiterhin in Blutadern von Nieren- und Lebergewebeproben nach. Es zeigte sich, dass NET die Gefäße nicht nur physisch blockieren, sondern überdies Proteine abbauen, die die Blutgerinnung hemmen, was Gerinnungsstörungen und Gefäßverschlüsse begünstigt. Klinische Studien mit einem Mukoviszidose-Medikament, das den Abbau von NET fördert und somit vielleicht bei schweren Covid-Fällen hilft, sind auf dem Weg.

All diese Befunde haben deutlich gemacht: Sars-CoV-2 bringt das Immunsystem mitunter dazu, den eigenen Organismus zu schädigen. Die angeborene Immunabwehr mit ihren Zytokinen, Monozyten, Neutrophilen und anderen Akteuren gerät dabei außer Kontrolle. Aber auch das adaptive Immunsystem kann aus dem Gleis geraten. Eines der auffälligsten Merkmale kritisch erkrankter Covid-Patienten ist der starke Verlust an T-Lymphozyten im Blut. Diese Zellen sind zentrale Akteure der lang anhaltenden adaptiven Immunantwort. Wenn der Organismus mit einem Virus infiziert ist, nimmt die Population jener T-Zellen, die gezielt gegen den Erreger vorgehen, üblicherweise mit der Zeit zu, so dass der Körper nach und nach Immunität erlangt. Bei besonders bedrohlichem Covid-Verlauf tritt das jedoch nicht ein.

Es gibt zwei Arten von T-Lymphozyten: solche, die virusinfizierte Zellen direkt vernichten, und solche, die die Immunantwort auf den Erreger koordinieren, nachdem sie Signale von Zytokinen erhalten haben. Bei Covid-Patienten, die stationäre Behandlung benötigen, lässt sich oft ein Verlust beider Zelltypen beobachten. Der Mangel hält außergewöhnlich lange an – bei manchen Erkrankten über mehrere Wochen.

Bei virusbedingten Atemwegserkrankungen wandern T-Lymphozyten aus dem Blut typischerweise in infiziertes Gewebe ein, geleitet von Chemokinen wie CXCL9 und CXCL10. Bei schwer kranken Covid-Patienten lassen sich im Blut aber kaum T-Zellen nachweisen. Zwar haben Forscher in diversen Studien die Lungen Betroffener untersucht und dort mit genetischen Sequenzierungsmethoden eine beträchtliche Menge von T-Lymphozyten gefunden. Nichtsdestoweniger bleibt bisher unklar, warum deren Blutspiegel so niedrig sind. Viele Mediziner nehmen an, dass die Zellen schlicht absterben, und tatsächlich gibt es zahlreiche Hinweise, die eine solche Annahme stützen.

Wieso verschwinden die Lymphozyten? Im Organismus kritisch erkrankter Covid-Patienten zirkulieren vermehrt T-Zellen, die auf Grund ihrer Rezeptorausstattung zu einem frühen Zelltod neigen – und überdurchschnittlich viele Moleküle, die an diese Rezeptoren binden und sie aktivieren. Denkbar erscheint zudem, dass das Knochenmark der Betroffenen nicht genügend Vorläuferzellen produziert, aus denen T-Lymphozyten hervorgehen. Wie wir wissen, beeinflussen Zytokine die Produktion von T-Zellen im Knochenmark. Ob das bei kritischen Covid-Verläufen eine Rolle spielt, ist noch nicht bekannt, obgleich entzündliche Zytokine im Körper der Betroffenen reichlich freigesetzt werden. Es könnte weiterhin sein, dass das Virus selbst T-Lymphozyten abtötet. Diese verschiedenen Hypothesen gilt es nun zu testen, woraus neue Therapieansätze entstehen könnten.

Viele von den Immunkomplikationen bei Covid-19 – drastisch erhöhte Zytokinmengen, Entzündungen in der Lunge, Gefäßverschlüsse und zu wenig Lymphozyten – kennen Kliniker bereits von anderen Viruserkrankungen der Atemwege. Sars-CoV-2 sticht dennoch heraus. Was an dem Erreger vor allem auffällt, ist die Leichtigkeit, mit der er von Mensch zu Mensch springt – schon vor dem Auftreten von Krankheitssymptomen und sogar bei Betroffenen, die überhaupt keine Symptome entwickeln.

Hochansteckend, ohne es zu merken

Zum Vergleich: Sars-CoV, der Erreger der Epidemie von 2002/2003, überträgt sich erst ab dem Beginn der Erkrankung und erreicht seine maximale Viruslast rund zehn Tage später. Bei Mers-CoV gipfelt die Viruslast sieben bis zehn Tage nach Einsetzen der Symptome. Bei Sars-CoV-2 ist das bereits drei bis fünf Tage nach Symptombeginn erreicht, und die Viruslast fällt schon vor ersten Krankheitszeichen sehr hoch aus. Die Betroffenen können den Erreger breit streuen, bevor sie nur das kleinste Kratzen im Hals spüren.

Einzigartig erscheint auch das breite Spektrum der Organe, die von Covid-19 betroffen sind. Das Virus verursacht Lungenprobleme, Nervenstörungen wie Geruchs- und Geschmacksverlust sowie beeinträchtigte Wahrnehmung, Komplikationen des Magen-Darm-Trakts und der Nieren, Blutgerinnsel, Herz-Kreislauf-Probleme und »Covid-Zehen«: frostbeulenähnliche Verletzungen an den Füßen. Selbst Neurone im Gehirn werden infiziert. Bei jenen, die das Schlimmste überstehen und sich erholen, können die Gewebeschäden monatelang bestehen bleiben. Betroffene klagen über anhaltende Müdigkeit und Muskelschwäche, Schlafstörungen, Ängstlichkeit und Depressionen.

Letztlich sind diese Befunde vielleicht gar nicht so überraschend. Drei Zelltypen, die in Blutgefäßen zu finden sind, nämlich Endothelzellen, Perizyten und glatte Muskelzellen, durchziehen jedes Gewebe. Sie alle sind mit ACE2-Rezeptormolekülen gespickt, jenen Eintrittspforten, durch die Sars-CoV-2 in die Körperzellen gelangt. Erschwerend kommt hinzu, dass Zytokin- und Bradykininstürme oft Gewebe schädigen, die aus solchen Zellen bestehen.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



FRANK HOERMANN / SVEN SIMON / PICTURE ALLIANCE

Sars-CoV nutzt den gleichen Rezeptor als Eintrittstor und kann ebenfalls Zytokinstürme sowie akutes Lungenversagen verursachen. Außerhalb der Lunge jedoch löst es viel seltener schwere Komplikationen aus als Sars-CoV-2. Die beiden Virusarten stimmen genetisch zu 80 Prozent überein; daher liegt die Vermutung nahe, die restlichen 20 Prozent seien für ihre Unterschiede verantwortlich. Freilich lassen sie sich nur bedingt vergleichen: Sars-CoV-2 hat schon heute viele tausend Mal mehr Menschen infiziert als sein Vorgänger.

Das zurückliegende Jahr mit all seinen wissenschaftlichen Erkenntnissen über das neue Coronavirus und all den Innovationen rund um Diagnostik, Therapie und Impfung beweist, dass Wissenschaftler und Ärzte gemeinsam Enormes leisten können – trotz notwendiger physischer Distanzierung. Noch nie ging der Wissenstransfer vom Labor zum Krankenbett so schnell vonstatten wie in der derzeitigen Krise. Dieses Vermächtnis wird auch dann noch bestehen, wenn der Schrecken von Sars-CoV-2 lange vorüber ist. Und es wird uns helfen, künftige Pandemien besser zu bekämpfen. ◀

QUELLEN

Del Valle, D.M. et al.: An inflammatory cytokine signature predicts Covid-19 severity and survival. *Nature Medicine* 26, 2020

Garvin, M.R. et al.: A mechanistic model and therapeutic interventions for Covid-19 involving a RAS-mediated bradykinin storm. *eLife* 9, 2020

Huang, C. et al.: 6-month consequences of Covid-19 in patients discharged from hospital: A cohort study. *The Lancet* 10.1016/S0140-6736(20)32656-8, 2021

Leppkes, M. et al.: Vascular occlusion by neutrophil extracellular traps in Covid-19. *EBioMedicine* 58, 2020

Liao, M. et al.: Single-cell landscape of bronchoalveolar immune cells in patients with Covid-19. *Nature Medicine* 26, 2020

Murk, W. et al.: Diagnosis-wide analysis of Covid-19 complications: An exposure-crossover study. *Canadian Medical Association Journal* 193, 2021



MEDIZIN

SIEGESZUG DER RNA-IMPfstOFFE

Die Covid-19-Pandemie hat weit reichende Folgen für die Impfstoffentwicklung: Sie beschleunigt deren Arbeitsabläufe dramatisch.

Elie Dolgin ist Wissenschaftsjournalist in Somerville, Massachusetts.

► spektrum.de/artikel/1823141



ARNA BOBROSIAN

► An einem Freitagnachmittag im März 2013 erhielt der Pharmazeut Andrew Geall einen Anruf. Drei Menschen in China hatten sich gerade mit einem neuen Erregerstamm der Vogelgrippe infiziert. Gealls Vorgesetzter beim Pharmaunternehmen Novartis wollte wissen, ob der Forscher und seine Kollegen bereit seien, ihre neue Impfstofftechnik einzusetzen. Ein Jahr zuvor hatte das Team kurze RNA-Stücke in kleine Tröpfchen aus Lipidverbindungen (so genannte Lipid-Nanopartikel) eingebettet und damit Ratten gegen eine virale Atemwegserkrankung immunisiert. Würde diese Methode nun auch gegen die Vogelgrippe helfen? Und ließe sie sich rasch anwenden?

Geall, der damals die Forschung über RNA-Impfstoffe bei Novartis leitete, erinnert sich: »Ich sagte: Natürlich, schicken Sie uns einfach die genetische Sequenz des Virus.« Am Montag begann sein Team damit, virale Sequenzabschnitte in Form von RNA-Strängen herzustellen. Am Mittwoch verpackten sie diese in Lipid-Nanopartikel. Am Wochenende darauf testeten sie den fertigen Impfstoff an Zellen – und eine Woche später an Mäusen. Ein geradezu halbsprecherisches Tempo. Geall und seine Kollegen hatten in einem Monat erreicht, was mit herkömmlichen Methoden der Impfstoffentwicklung mindestens ein Jahr dauert.

Der Forscher und seine Mitarbeiter fanden allerdings nie heraus, ob ihr Vakzin beim Menschen wirkt – genauso wenig, wie sie das von mehreren anderen RNA-Impfstoffen erfuhren, die sie entwickelt hatten. Denn 2013 ließ sich RNA klinischer Qualität nur in sehr begrenzten Mengen herstellen, die für die Immunisierung größerer Patienten-

MASSENFERTIGUNG Ein Arbeiter prüft eine Produktionsanlage im Schweizer Pharmaunternehmen Lonza. Die Firma gehört zu jenen, die den RNA-Impfstoff von Moderna herstellen.

zahlen nicht ausreichen. 2015 verkaufte Novartis seine Impfstoffsparte.

Fünf Jahre und eine weltweite Pandemie später beweisen RNA-Impfstoffe nun ihren Wert. Ende 2020 bis Anfang 2021 wurden zwei solche Substanzen – entwickelt von den Unternehmen Biontech und Pfizer sowie von Moderna – in den USA, der EU und weiteren Ländern für die Anwendung am Menschen zugelassen. Die Vakzine sollen Covid-19-Erkrankungen verhindern. Somit scheint die Ära der RNA-Impfstoffe angebrochen, und dutzende Unternehmen springen auf den Zug auf. »Alle großen Pharmakonzerne prüfen die neue Technologie und loten mögliche Anwendungen aus«, sagt Jeffrey Ulmer, ehemals leitender Wissenschaftler in der Impfstoffabteilung des britischen Pharmaunternehmens GlaxoSmithKline. Zuvor hatte er mit Andrew Geall bei Novartis zusammengearbeitet.

Die Idee, RNA-Moleküle zum Immunisieren zu verwenden, gibt es schon seit fast drei Jahrzehnten. Denn der Ansatz verheißt große Vorteile. Insbesondere erlaubt er es, einige Entwicklungsphasen drastisch zu verkürzen und Vakzine somit viel schneller auf den Markt zu bringen. RNA-Impfstoffe könnten dabei helfen, besonders widerspenstige Krankheiten wie Tuberkulose, Aids und Malaria endlich in den Griff zu bekommen. Und sie könnten die Wirksamkeit der jährlichen Gripeschutzimpfung erheblich verbessern.

Bis es so weit ist, gilt es allerdings diverse Hürden zu überwinden. Das Rohmaterial für RNA-Impfstoffe ist teuer. Ihre Nebenwirkungen können potenziell schwerwiegend sein. Und ihr Vertrieb ist kostspielig, unter anderem weil er eine aufwändige Kühlkette verlangt. Momentan erscheint es vordringlich, Covid-19 zu bekämpfen, weshalb Gelder und Forschungskapazitäten in großem Umfang dafür bereitstehen. Das hilft, diese Probleme zu überwinden. Aber was, wenn die Krise vorbei ist und nicht mehr so viele Mittel fließen? Dann könnten sich viele Unternehmen veranlasst sehen, wieder von RNA-Vakzinen abzulassen.

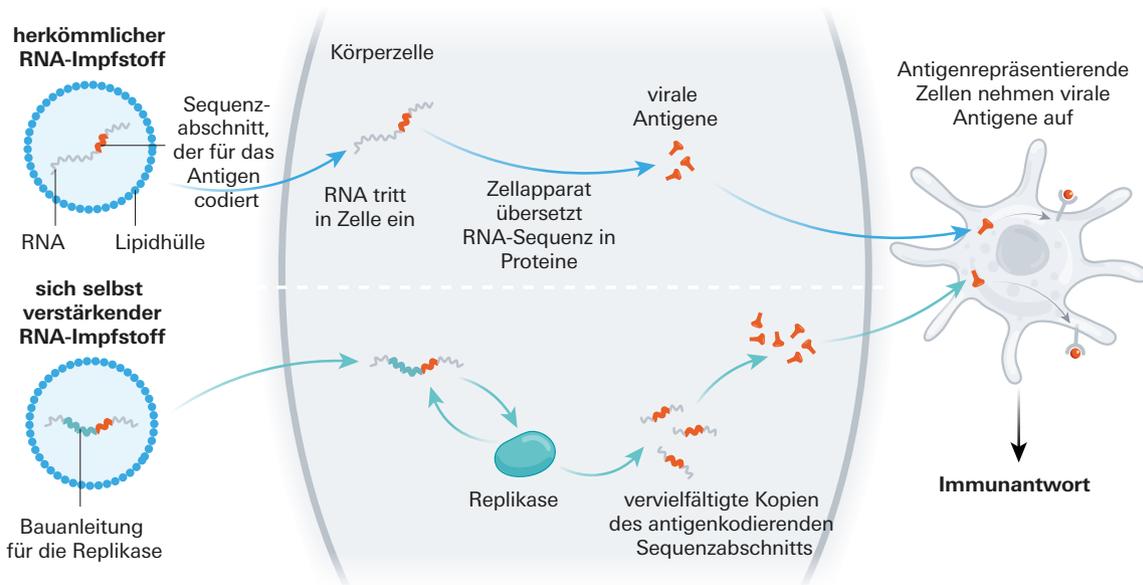
Ein Bauplan als medizinischer Wirkstoff

»Obgleich sich die RNA-Technologie bewährt hat, ist sie noch nicht in trockenen Tüchern«, sagt Philip Dormitzer, leitender Wissenschaftler in der Virusimpfstoffforschung bei Pfizer, früher gemeinsam mit Geall bei Novartis beschäftigt. »Doch da wir jetzt gesehen haben, wie gut sie bei Covid-19 funktioniert, liegt es natürlich nahe, sie noch anderweitig einzusetzen.«

Impfstoffe lenken die Aufmerksamkeit des Immunsystems auf bestimmte Krankheitserreger, so dass es diese besser erkennen und zerstören kann. Normalerweise nutzen Mediziner hierfür abgeschwächte Keime oder bestimmte Bestandteile der Erreger, etwa Protein- oder Zuckermole-

Wie sich RNA-Impfstoffe verbessern lassen

RNA-Vakzine bringen die Körperzellen der Geimpften dazu, einen Bestandteil eines Krankheitserregers – ein so genanntes Antigen – zu produzieren. Die Immunabwehr wird dann darauf aufmerksam, erkennt das Antigen als fremd und baut eine Abwehr dagegen auf. Mediziner möchten solche Impfstoffe wirksamer machen, um sie in niedrigeren Dosen verabreichen zu können beziehungsweise nur eine statt zweier Dosen zu benötigen, bis die volle Schutzwirkung erreicht ist. Ein Ansatz hierfür lautet, den Bauplan für eine Replikase in die RNA-Sequenz einzufügen – für ein Enzym also, das den RNA-Strang viele Male kopiert und somit zahlreiche Vorlagen zur Antigen-Herstellung liefert, so dass die Körperzelle mehr Erregerbestandteile erzeugt.



NIK SPENCER/NATURE. DOUGIN, E. HOW COVID UNLOCKED THE POWER OF RNA. NATURE 568, 2021 | DOI:10.1038/D41586-021-00019-0

küle. In den Körper der Patienten gespritzt, werden solche so genannten Antigene vom Immunsystem als fremd erkannt, woraufhin der Organismus kurz- und langfristige Abwehrmaßnahmen gegen sie entwickelt. Neu an RNA-Impfstoffen ist, dass sie nicht das Antigen selbst enthalten, sondern die Bauanleitung, um es herzustellen. Mit Hilfe dieses Konstruktionsplans, verschlüsselt in der Sequenz der RNA-Bausteine, produzieren die Körperzellen des Patienten den jeweiligen Erregerbestandteil selbstständig. Das macht den Organismus quasi zu seiner eigenen Impfstofffabrik.

Erste Tests einer RNA-basierten Impfung gab es in den 1990er Jahren. Forscher bei einer Vorgängerfirma des heutigen Pharmaunternehmens Sanofi Pasteur behandelten damals Mäuse mit einem RNA-Vakzin, das die Bauanleitung eines Influenza-Antigens enthielt. Tatsächlich trat eine Immunisierung ein, aber die Lipidmoleküle, mit denen das Team den Arzneistoff in die Körperzellen schleuste, erwiesen sich als zu giftig, um sie menschlichen Patienten zu verabreichen. Es vergingen weitere zehn Jahre, bis Unternehmen, die Medikamente auf Basis der RNA-Interferenz (siehe »Spektrum« Dezember 2020, S. 12) entwickelten, die Lipid-Nanopartikel-Technologie erfanden, welche die heutigen Covid-19-Impfstoffe möglich macht. »Das war der Durchbruch«, erinnert sich Nick Jackson, zuständig für innovative Technologien bei der Coalition for Epidemic Preparedness Innovations in Oslo, einem globalen Programm zur Beschleunigung der Impfstoffentwicklung. »Lipid-Nanopartikel erlaubten es uns endlich, RNA-Moleküle gegen ein breites Spektrum von Krankheiten einzusetzen.«

Im Jahr 2012, als Andrew Geall und sein Team erstmals mit immunisierender RNA in Lipid-Nanopartikeln experimentierten, begann sich auch das US-Verteidigungsministerium für das Thema zu interessieren. Dessen Behörde DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) fing an, Forschergruppen bei den Unternehmen Novartis, Pfizer, AstraZeneca, Sanofi Pasteur und anderswo zu finanzieren, die RNA-Vakzine und -Arzneistoffe entwickelten. Keines von den großen Unternehmen blieb jedoch dauerhaft dabei. »Sie scheuten die regulatorischen Risiken der neuen Wirkstoffe, obwohl die Daten gut aussahen«, erzählt Dan Watendorf, früherer Programmmanager bei der DARPA.

Doch zwei kleine Firmen mit Verbindungen zu dieser Behörde arbeiteten weiter an dem Ansatz. Eine war CureVac in Tübingen, die 2013 mit der Erprobung eines entsprechenden Tollwutimpfstoffs am Menschen begann. CureVac prüft zurzeit ein Covid-RNA-Vakzin in einer klinischen Studie der Phase III (siehe »Spektrum« Juni 2020, S. 25). Bei dem anderen Unternehmen handelte es sich um Moderna in Cambridge, Massachusetts, das – gestützt auf DARPA-finanzierte Arbeiten – Ende 2015 einen RNA-Impfstoff gegen einen Vogelgrippe-Erreger in die klinische Testphase brachte. Das Vakzin erzeugte hinreichend starke Immunreaktionen, der Ansatz schien Erfolg versprechend. Moderna weitete sein Engagement auf dem Gebiet deshalb aus und wandte sich RNA-Impfstoffen gegen Zytomegalie-, Chikungunya- und Zika-Viren sowie drei Erregern von Atemwegserkrankungen bei Kindern zu.

2019 gesellte sich als großer Konzern noch GlaxoSmithKline hinzu, der den Hauptteil der Impfstoffsparte von

AUF EINEN BLICK DER KÖRPER ALS IMPFSTOFFFABRIK

- 1 Um die Covid-19-Pandemie zu bekämpfen, sind erstmals RNA-Impfstoffe für die Anwendung am Menschen zugelassen worden.
- 2 Diese Vakzine enthalten RNA-Moleküle, die den Bauplan bestimmter Virusbestandteile tragen. Der Körper stellt die Virusfragmente daraus selbst her und entwickelt eine Immunantwort dagegen.
- 3 RNA-Impfstoffe lassen sich auch gegen zahlreiche weitere Krankheiten einsetzen. Die Technik steht aber noch am Anfang.

Novartis übernommen hatte. Das Unternehmen startete in jenem Jahr seinerseits mit der Prüfung eines RNA-basierten Tollwutimpfstoffs.

Anfang 2020 hatte die klinische Entwicklung von RNA-Impfstoffen noch relativ wenig zu bieten. Nur ein dutzend Arzneistoffkandidaten waren am Menschen getestet worden; vier davon waren bereits in der frühen Prüfphase gescheitert; und nur ein einziger, gegen Zytomegalie-Viren, hatte den Schritt in eine größere Folgestudie geschafft.

Von der Genomsequenz zum einsatzfähigen Präparat in nur vier Tagen

Dann kam das neue Coronavirus, und plötzlich interessierten sich alle für RNA-Vakzine. Binnen zehn Monaten traten mindestens sechs solche Wirkstoffe gegen Covid-19 in die klinische Testphase ein; mehrere weitere folgen. RNA-Vakzine eignen sich allerdings auch besonders gut dafür, rasch entwickelt zu werden. Aus der genetischen Sequenz eines Krankheitserregers können Forscher schnell einen passenden Abschnitt auswählen, der die Bauanleitung eines Antigens trägt. Den fügen sie dann in eine DNA-Matrize ein und stellen damit maßgeschneiderte RNA-Stücke her, welche sie anschließend in Lipid-Nanopartikel verpacken. Damit ist das Präparat im Prinzip einsatzbereit.

Moderna, um ein Beispiel zu nennen, absolvierte diesen Prozess innerhalb von vier Tagen, nachdem das Unternehmen die Genomsequenz von Sars-CoV-2 erhalten hatte. Die Forscher konzentrierten sich dabei auf das Spike-Protein des Virus, ein Oberflächenmolekül, mit dessen Hilfe der Erreger in Zellen eindringt. Zusammen mit der US-Behörde NIH (National Institutes of Health) demonstrierte Moderna an Labormäusen, dass der so geschaffene Impfstoffkandidat grundsätzlich funktioniert. Binnen lediglich zweier Monate startete die Firma erste Tests am Menschen.

Theoretisch lässt sich jeder RNA-Impfstoff so schnell entwickeln. »Das Ganze funktioniert wie eine Produktplattform, auf der sich unterschiedlichste Vakzine aufbauen lassen«, sagt John Shiver, Leiter der Impfstoffforschung und -entwicklung bei Sanofi Pasteur. »Man muss nicht

jedes Mal den gesamten Prozess neu aufrollen.« Im Gegensatz dazu erfordern klassische Ansätze der Impfstoffentwicklung ein maßgeschneidertes, zeitaufwändiges und teures Verfahren für jeden einzelnen Kandidaten. Das erklärt, warum staatliche Gesundheitsbehörden immer bereits Monate vor der Grippezeit entscheiden müssen, welche Stämme die jährliche Gripeschutzimpfung abdecken soll. Diese Vorauswahl stimmt oft nur zum Teil mit den Stämmen überein, die dann tatsächlich grassieren, aber sie lässt sich in der laufenden Saison nicht mehr rückgängig machen oder korrigieren. Infolgedessen wirkt die Gripeschutzimpfung selten zu mehr als 60 Prozent.

Mit RNA-Impfstoffen könnten die Hersteller das saisonale Vakzin viel schneller produzieren und somit auch rascher auf das Infektionsgeschehen reagieren. »Man kann fast im Handumdrehen die Sequenz anpassen und an die aktuell zirkulierenden Erregerstämme anpassen«, sagt Ron Renaud, Geschäftsführer von Translate Bio, einem Unternehmen auf dem Gebiet der RNA-Therapeutika, das gemeinsam mit Sanofi Pasteur an RNA-basierten Impfstoffen gegen Grippe, Covid-19 und andere virale sowie bakterielle Erreger arbeitet.

Dank ihrer Plattform-Eigenschaften haben RNA-Impfstoffe zudem einen großen Einfluss auf die Grundlagenforschung. Justin Richner entwickelt an der University of Illinois in Chicago mit seinem Team einen RNA-basierten Dengue-Impfstoff. Der Immunologe und seine Kollegen verändern fortlaufend die Sequenz der RNA-Stränge, die für das Hüllprotein codieren, mit dem das Virus menschliche Zellen attackiert. Daraus sind bereits rund 15 Wirkstoffkandidaten hervorgegangen, die das Team an Mäusen getestet hat. »Es ist wirklich einfach, die codierenden Sequenzabschnitte des Vazins zu manipulieren und mit dem so veränderten Stoff zu experimentieren«, schildert Richner.



ISTOCK / JURGAR

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Fortschritte in der RNA-Technologie helfen den Forschern nun, sich einem heiligen Gral der Impfstoffentwicklung zu nähern: einer universellen Grippe-Immunsierung, die gegen jeden Virusstamm wirkt und somit keiner jährlichen Auffrischung mehr bedarf. Andere Wissenschaftler haben Impfstoffe gegen HIV und weitere tödliche Krankheiten im Visier, die besonders arme Länder heimsuchen. Bisher waren entsprechende Vakzine nicht in Reichweite, weil die Erreger ständig mutieren und dabei ihre Oberflächenstrukturen verändern, womit sie sich der Immunantwort immer wieder entziehen. Einige Pathogene haben zudem komplizierte Lebenszyklen, die es erschweren, geeignete Zielantigene auszuwählen, etwa Malaria-Erreger.

RNA-Impfstoffe könnten solche Schwierigkeiten überwinden helfen – nicht nur dank ihres hohen Entwicklungstempos, sondern auch, weil sie es erlauben, gegen mehrere Antigene gleichzeitig zu immunisieren. Deren Baupläne lassen sich entweder in einem einzigen RNA-Strang codieren oder in mehreren separaten, aber gemeinsam verarbeiteten Stücken.

Vor sämtlichen Grippeviren geschützt dank zwölf RNA-Strängen

Der Mediziner Norbert Pardi von der University of Pennsylvania in Philadelphia hat mit Hilfe dieses Ansatzes einen experimentellen Grippeimpfstoff hergestellt. Das Vakzin enthält vier RNA-Stränge, von denen jeder für ein anderes Influenza-Protein codiert. Mäuse, die das Mittel gespritzt bekamen, waren anschließend vor Infektionen mit einer bestimmten Gattung der Influenzaviren geschützt. Jetzt hoffen Pardi und seine Kollegen an der Icahn School of Medicine at Mount Sinai in New York, entsprechende Vakzine auch gegen die anderen beiden Gattungen zu finden, die für den Menschen ansteckend sind. Gelingt das, wollen die Forscher alle drei Präparate zu einer Schutzimpfung mit insgesamt zwölf RNA-Strängen kombinieren, die theoretisch vor sämtlichen Grippeviren schützen und somit die jährliche Auffrischungsimpfung überflüssig machen sollte. »Erzeugt man eine Immunantwort, die sich gegen mehrere Strukturen des Virus zugleich richtet, lässt sich eine breite Schutzwirkung erreichen«, sagt Pardi.

Trotz ihrer potenziellen Vorteile bergen RNA-Impfstoffe aber noch manches Problem. »Die Technologie ist sehr jung und lange nicht ausgereift«, betont Robin Shattock, Immunologe am Imperial College London. »Auf diesem Feld wird in den kommenden Jahren noch viel passieren.« Da ist zunächst die Kühlung: Der Impfstoff von Biontech/Pfizer lässt sich längerfristig nur bei –70 Grad Celsius aufbewahren, der von Moderna bei –20 Grad Celsius; bei höheren Temperaturen bleiben die Präparate auf Dauer nicht stabil.

Mindestens zwei Unternehmen behaupten, RNA-Impfstoffe gegen Covid-19 in der Pipeline zu haben, die eine solche Kühlung nicht benötigen. CureVac, das die gleichen Lipid-Nanopartikel verwendet wie Biontech/Pfizer, setzt RNA-Stränge ein, die sich zu kompakten 3-D-Strukturen falten. Das soll eine monatelange sichere Lagerung bei Kühlschranktemperaturen erlauben, teilt die technische Direktorin Mariola Fotin-Mleczek mit. Und die chinesische Firma Suzhou Abogen Biosciences, die ebenfalls einen Covid-RNA-Impfstoff an Menschen testet, möchte mittels herausragender Qualität und Reinheit der Lipid-Nanopartikel erreichen, dass sich das Präparat eine Woche lang ohne Wirksamkeitsverlust bei Raumtemperatur aufbewahren lässt.

Eine weitere Herausforderung: Die bisher entwickelten RNA-Impfstoffe, ob gegen Covid-19 oder andere Krankheiten, müssen meist in zwei aufeinander folgenden Dosen verabreicht werden, um ihre volle Wirkung zu entfalten. Es ist allgemein bekannt, dass viele Patienten bei Mehrfachimpfungen vom vorgeschriebenen Prozedere abweichen und nach dem Erhalten der ersten Dosis nicht mehr beim Arzt auftauchen – weil sie die folgenden vergessen oder

nicht für nötig halten. Das wird vermutlich auch bei RNA-Vakzinen gegen Sars-CoV-2 der Fall sein.

Neue Verabreichungsmethoden könnten dieses Problem umgehen. Das Unternehmen Vaxess Technologies in Cambridge, Massachusetts, vertreibt ein tragbares Hautpflaster, das mit winzigen Nadeln gespickt ist. Im Hautgewebe lösen sich die Nadeln langsam auf und setzen dabei den Impfstoff über Tage und Wochen hinweg im Organismus frei. Das ähnelt dem Verlauf einer natürlichen Infektion mehr als eine einmalige Gabe des Vakzins und soll eine stärkere Immunantwort triggern.

Die allmähliche Freisetzung des Impfstoffs könnte helfen, ein drittes Problem zu lösen: die Nebenwirkungen. Der Organismus scheint auf derzeitige RNA-Impfstoffe heftiger zu reagieren als auf herkömmliche Vakzine, auch wenn es sich dabei um vorübergehende Effekte handelt. Mehr als 80 Prozent der Probanden, die in klinischen Studien den Moderna-Impfstoff erhielten, entwickelten Müdigkeitsattacken, Muskelschmerzen und andere Beeinträchtigungen. Inmitten einer weltweiten tödlichen Pandemie mag das als Nebeneffekt einer Immunisierung akzeptabel erscheinen. Anders wäre es bei Routinebehandlungen wie der jährlichen Gripeschutzimpfung, wie der US-Impfstoffexperte Stanley Plotkin betont, der unter anderem die Firma CureVac berät. Bei solchen Eingriffen würden die Menschen entsprechende Auswirkungen nicht ohne Weiteres hinnehmen – und schon gar nicht bei Vakzinen, die für Kleinkinder bestimmt sind. Dort, so Plotkin, »möchte man sicherlich etwas haben, was weniger reaktogen ist«.

Verunreinigungen in den Wirkstoffpräparaten gelten als wichtige Ursache für Nebenwirkungen, lassen sich aber nicht vollständig verhindern. Daher verabreichen Impfstoffhersteller oft eher niedrige Dosen, um die Behandelten einer so geringen Kontamination wie möglich auszusetzen. Allerdings vermitteln kleine Mengen auch weniger von der gewünschten medizinischen Wirkung. Unternehmen wie Arcturus Therapeutics in San Diego, Kalifornien, und VaxEquity bei London bieten möglicherweise eine Lösung dafür an. Sie haben Covid-Impfstoffe mit sich selbst vervielältigenden RNA-Molekülen entwickelt (siehe Kasten »Wie sich RNA-Impfstoffe verbessern lassen«). Deren Sequenzen enthalten nicht bloß den Bauplan des Antigens, flankiert von regulatorischen Abschnitten, sondern darüber hinaus Anweisungen an die RNA, sich selbst zu kopieren. Das macht die Molekülkonstrukte ziemlich kompliziert und schwer zu optimieren. Aber es erlaubt, die Dosis zu senken. Und die sich selbst replizierende RNA ahmt eine natürliche Virusinfektion besser nach, was eine stärkere, breiter wirksame Immunantwort provoziert und somit ein mehrmaliges Impfen vielleicht verzichtbar macht.

Biontech forscht ebenfalls über RNA-Vakzine, die sich selbst verstärken. Bevor Sars-CoV-2 auftauchte, war das Unternehmen hauptsächlich auf Krebsimpfstoffe fokussiert. Mit der wachsenden Reputation, den erweiterten Produktionskapazitäten und den beträchtlichen Umsätzen, die aus dem Verkauf des Covid-19-Impfstoffs zu erwarten sind, »werden wir unser Engagement im Bereich der Infektionskrankheiten wohl erheblich ausweiten können«, wie Biontech-Vorstandsvorsitzender Uğur Şahin einschätzt.

Andere Firmen berichten Ähnliches. Ziphys Vaccines in Oostkamp, Belgien, beispielsweise wurde im Mai 2019 gegründet – zunächst, um RNA-basierte Therapeutika für relativ seltene Erkrankungen wie die Duchenne-Muskeldystrophie und die Mukoviszidose zu entwickeln. 2020 hat das Unternehmen seine Pläne angepasst, nachdem es mit der Arbeit an einem sich selbst verstärkenden Covid-RNA-Impfstoff begonnen hatte. Geschäftsführer Chris Cardon sagt, die Firma sei jetzt dabei, Mittel in Höhe von 37 Millionen Dollar einzuwerben, um 14 vorklinische Programme für entsprechende Arzneien voranzutreiben, die sich gegen eine Vielzahl von Infektionskrankheiten richten.

Eine neue Technologie und ihre ungewisse Zukunft nach der Pandemie

Nichtsdestoweniger könnten Entwickler von RNA-Vakzinen bald wieder auf finanziellen Gegenwind stoßen. Viele Branchenkenner erwarten, das derzeitige große Interesse werde nachlassen, sobald die Pandemie abklingt. Schon jetzt haben es manche Firmen nicht leicht. »Es ist ziemlich schwer, Geldgeber davon zu überzeugen, auf diese Technologie zu setzen«, sagt Nathaniel Wang, Geschäftsführer von Replicate Bioscience im kalifornischen San Diego – einem Unternehmen, das er 2020 gemeinsam mit Andrew Geall gegründet hat, um RNA-basierte Therapeutika gegen Krebserkrankungen zu entwickeln. Obwohl die Firma darüber hinaus mehrere akademische und kommerzielle Partnerschaften geschmiedet hat, um an RNA-Vakzinen gegen Covid-19 und Zika zu arbeiten, habe sie Finanzierungsschwierigkeiten, wie Wang schildert.

Jetzt, wo RNA-Impfstoffe Schlagzeilen machen, erinnern sich Andrew Geall und seine früheren Mitarbeiter oft an ihre Zeit bei Novartis. Wäre die Impfstoffsparte des Unternehmens nicht 2015 verkauft worden, hätten sie dann vielleicht besser dazu beitragen können, Ebola- oder Zika-Ausbrüche zu verhindern? »Es ist immer ein wenig traurig, zurückzublicken«, sagt Christian Mandl, früherer Leiter in der Impfstoffforschung und -entwicklung bei Novartis. Doch er tröstet sich mit dem derzeitigen Siegeszug der Covid-Impfstoffe. »Ich bin sehr stolz, dass wir einen wertvollen Beitrag dazu geleistet haben.« ◀

QUELLEN

Beissert, T. et al.: A trans-amplifying RNA vaccine strategy for induction of potent protective immunity. *Molecular Therapy* 28, 2020

Frey, A. W. et al.: A multi-targeting, nucleoside-modified mRNA influenza virus vaccine provides broad protection in mice. *Molecular Therapy* 28, 2020

Geall, A. J. et al.: Nonviral delivery of self-amplifying RNA vaccines. *PNAS* 109, 2012

Zhang, N. N. et al.: A thermostable mRNA vaccine against Covid-19. *Cell* 182, 2020

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 589, S. 189–191, 2021



QUANTENPHYSIK MIT ÜBERLICHT- GESCHWINDIGKEIT DURCH DIE WAND

Quantenmechanische Objekte können Hindernisse »durchtunneln«. Dabei bewegen sie sich laut jüngsten Experimenten möglicherweise sogar schneller als das Licht.



Natalie Wolchover ist Wissenschaftsjournalistin in New York.

► spektrum.de/artikel/1823144

DURCHLÄSSIGE SCHRANKE

Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit können Teilchen eine Barriere durchdringen, selbst wenn sie dafür eigentlich nicht genügend Energie besitzen.

Als die Quantenmechanik die Bühne der Naturwissenschaft betrat, mussten sich die Physiker plötzlich mit vielen irritierenden Konsequenzen der neuen Gleichungen auseinandersetzen. Rasch entdeckten sie eine der wohl seltsamsten Folgen: den so genannten Tunneleffekt. Er verdeutlicht, wie sehr sich winzige Objekte von größeren unterscheiden. Wirft man einen Ball gegen eine Wand, prallt er ab. Lässt man ihn bergab rollen, bleibt er im Tal liegen. Für Teilchen wie Elektronen gelten andere Regeln. Sie haben eine kleine Chance, »durch den Berg zu schlüpfen und dem Tal wieder zu entkommen«, wie es die Physiker Ronald Wilfred Gurney und Edward Uhler Condon von der US-amerikanischen Princeton University in einer der frühesten Beschreibungen des Effekts im Fachjournal »Nature« 1928 formulierten.

Das Phänomen ist zwar rätselhaft, löst zugleich aber viele Probleme. Die Fähigkeit von Teilchen, scheinbar unüberwindliche Energiebarrieren einfach zu durchqueren, erklärt diverse chemische Vorgänge, radioaktive Zerfälle und die Strahlung der Sonne, in der die Kerne der Wasserstoffatome dank des Tunneleffekts ihre gegenseitige Abstoßung überwinden und miteinander verschmelzen.

Beim näheren Hinschauen gingen die Wissenschaftler einer Frage zuerst bloß neugierig, dann immer verzweifelter nach: Wie lange dauert es wohl, bis ein Teilchen eine solche Wand durchtunnelt hat? Die darauf gefundenen Antworten schienen keinen Sinn zu ergeben.

Bereits 1932 veröffentlichte der US-Physiker LeRoy Archibald MacColl vorläufige Berechnungen zur Tunnelzeit, doch erst 30 Jahre später setzte sich der Ingenieur Thomas Hartman von Texas Instruments eingehend mit den erstaunlichen mathematischen Konsequenzen des Phänomens auseinander. Hartmans Aufsatz von 1962 zufolge ist das Hindernis in Wirklichkeit eine Abkürzung. Der Weg hindurch dauert weniger lang, als wenn es gar nicht vorhanden wäre. Noch verblüffender war die Erkenntnis, dass eine dickere Wand kaum die zum Durchqueren benötigte Zeit verlängert. Bei einer hinreichend ausgedehnten Barriere hüpfen die Teilchen zügiger von einer Seite zur anderen,

als Licht bräuchte, um die gleiche Strecke im leeren Raum zu überwinden. Der Tunneleffekt schien also eine vermeintliche physikalische Unmöglichkeit zu erlauben, nämlich eine Reise schneller als das Licht.

Die Diskussion darum drehte sich jahrzehntelang im Kreis, zum Teil, weil die Frage einige der rätselhaftesten Aspekte der Quantenwelt berührt. »Sie führt zurück zum allgemeinen Problem einer Definition von Zeit und wie wir sie in der Quantenmechanik messen und interpretieren sollen«, kommentiert Eli Pollak, ein Theoretiker am Weizmann Institute of Science im israelischen Rehovot. Bis heute haben Physiker mindestens zehn alternative mathematische Formulierungen der Tunnelzeit abgeleitet, von denen jede eine andere Perspektive auf den Prozess widerspiegelt. Keine der Herangehensweisen löst das Problem.

Wie misst man die Geschwindigkeit von etwas, was sich zugleich überall und nirgends befindet?

Neuerdings rückt das Phänomen dank einer Reihe trickreicher Laborexperimente wieder ins Rampenlicht. Sie bestimmen die Tunnelgeschwindigkeit mit ungekannter Genauigkeit. So hat ein Team um Aephraim Steinberg von der University of Toronto 2020 eine viel beachtete Messung auf Basis der so genannten Larmor-Präzession veröffentlicht. Mit diesem Ansatz der Zeitmessung ermittelten die Forscher, wie lange Rubidiumatome brauchen, um durch ein sie abstoßendes Feld aus Laserstrahlung zu schlüpfen.

»Die Technik ist die beste und intuitivste Art für den Zweck, und in dem Experiment wurde sie zum ersten Mal sehr schön angewendet«, kommentiert Igor Litvinyuk von der australischen Griffith University. Er hatte 2019 die Dauer des Tunnelns auf andere Weise untersucht. Auch den Theoretiker Luiz Manzoni vom Concordia College in Minnesota überzeugt die Herangehensweise: »Die Kollegen messen tatsächlich die Tunnelzeit.«

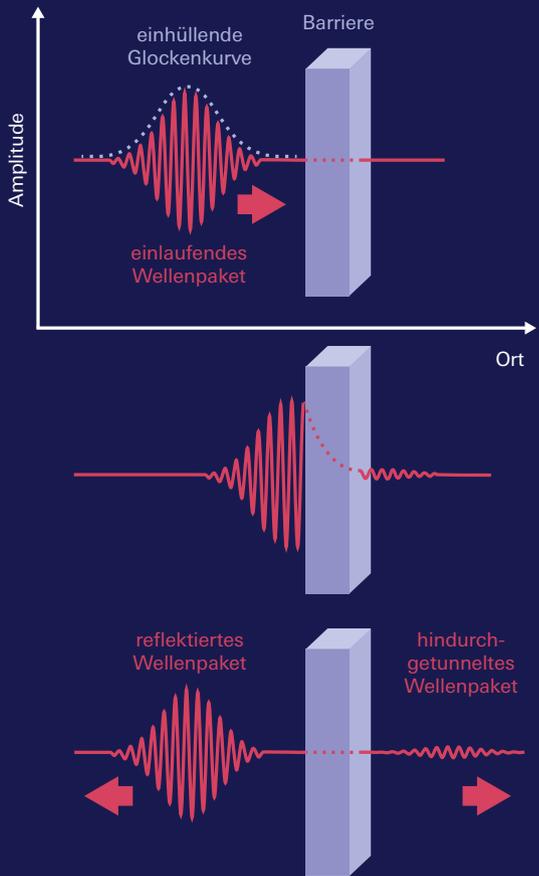
In den sechs Jahrzehnten, die seit Hartmans Analyse vergangen sind, kamen Physiker immer zum Ergebnis, dass der Tunneleffekt schneller als mit Lichtgeschwindigkeit abläuft – unabhängig davon, wie sorgfältig sie die Tunnelzeit umdefiniert haben oder wie präzise sie den Vorgang im Labor verfolgen konnten. Allerdings ist es schwierig, die Frage nach der Dauer genau zu beantworten, denn das führt zu einer weiteren: Was ist real?

Auf den uns vertrauten makroskopischen Skalen ist die Zeit, die ein Objekt braucht, um von A nach B zu gelangen, schlicht die Entfernung geteilt durch seine Geschwindigkeit. Aber in der Quantenmechanik ist die exakte Kenntnis beider Werte unmöglich; ein Teilchen hat vielmehr eine Reihe von möglichen Orten und Geschwindigkeiten. Aus diesem Spektrum von Optionen kristallisieren sich im Moment der Messung die konkreten Eigenschaften irgendwie heraus. Wie das genau geschieht, ist bis heute eines der größten Mysterien der Theorie.

Deswegen ist ein Teilchen, solange es nicht detektiert wird, überall und nirgendwo. Das erschwert Aussagen darüber, wie lange es sich in einem bestimmten Bereich aufgehalten hat, etwa innerhalb einer Wand. »Man kann nicht angeben, wie viel Zeit es dort verbringt«, erläutert Litvinyuk, »denn es kann an zwei Orten gleichzeitig sein.«

AUF EINEN BLICK VERBOTENE ABKÜRZUNG

- 1 Nach den Gesetzen der Quantenmechanik können Teilchen eine Barriere durchdringen, obwohl ihre Energie an sich dazu nicht ausreicht: Sie »tunneln« auf die andere Seite.
- 2 Theoretiker vermuten, dass der Vorgang weniger Zeit benötigt als der gleiche Weg durch den leeren Raum. Im Extremfall kommt das einer Reise schneller als mit Lichtgeschwindigkeit gleich.
- 3 Bei Laborversuchen bestimmten Physiker die für den Tunneleffekt benötigten Zeiten nun hochgenau. Tatsächlich sind die Teilchen dabei erstaunlich schnell.



TUNNELEFFEKT Quantenmechanisch lässt sich ein Teilchen durch ein »Wellenpaket« beschreiben. Des- sen Amplitude liefert die Wahrscheinlichkeit dafür, das Objekt an einem bestimmten Ort zu registrieren. Wenn es mit einer Energiebarriere zusammenstößt, teilt es sich auf. Der Großteil der Welle wird reflektiert, doch auch hinter der Wand gibt es eine kleine Chance, das Teilchen anzutreffen.

Um das Problem besser zu verstehen, kann man sich eine Glockenkurve vorstellen, eine Verteilung von Wahr- scheinlichkeiten für die möglichen Orte eines Teilchens (siehe Grafik »Tunneleffekt«) – ein »Wellenpaket«. Es hat seinen Mittelpunkt an Position A und rollt wie der Berg eines Tsunamis auf ein Hindernis zu. Die Gleichungen der Quantenmechanik beschreiben, wie es sich beim Auftreffen in zwei Teile aufspaltet. Der größere von beiden wird zurück in Richtung A reflektiert. Aber eine kleinere Menge von Wahrscheinlichkeiten schlüpft durch die Barriere und bewegt sich weiter zum Punkt B. Ein Detektor hinter der Wand hat deswegen eine gewisse Chance, das Teilchen dort zu registrieren.

Wenn ein Objekt am Ort B ankommt, was kann man dann über seine Reise dorthin oder seine Zeit im Hindernis

sagen? Bevor es im Moment der Messung plötzlich bei B auftaucht, war es gewissermaßen zweigeteilt – sowohl reflektiert als auch transmittiert. Damit verschwimmt die Bedeutung des Begriffs Tunnelzeit. Und trotzdem wechsel- wirkt jedes Teilchen, das bei A startet und bei B endet, unbestreitbar mit der Barriere dazwischen. Laut Eli Pollak ist diese Interaktion »ein Vorgang in der Zeit«. Die Frage ist, was für eine Art Zeit das sein soll.

Aephraim Steinberg ist nach eigenen Angaben seit seinem Studium in den 1990er Jahren von der Tunnelzeit regelrecht besessen. Für ihn rühren die Schwierigkeiten von der eigenartigen Natur der Zeit her. Objekte haben Eigen- schaften wie Masse oder Ort. Sie haben allerdings keine intrinsische Zeit, die wir direkt messen könnten. »Ich kann mich nach der Position eines Baseballs erkundigen, aber die Frage »Was ist seine Zeit?« ergibt keinen Sinn«, erläutert Steinberg. »Zeit ist kein Merkmal, das ein Teilchen besitzt.« Stattdessen verfolgen wir Veränderungen in der Welt, etwa das Ticken von Uhren, und nennen es den Verlauf der Zeit. Doch beim Szenario des tunnelnden Teilchens steckt in diesem keine eigene Uhr. Welche Änderungen sollten wir also registrieren? Die Physiker haben viele mögliche Ant- worten parat.

Statistik statt exakter Werte

Hartman verfolgte 1962 beispielsweise einen sehr simplen Ansatz. Er berechnete den Unterschied hinsichtlich der wahrscheinlichsten Ankunftszeit eines Teilchens, das ungestört von A nach B wandert, gegenüber einem, das eine Barriere passieren muss. Dabei berücksichtigte er, wie das Hindernis die Position des Maximums des hindurch- gelaufenen Wellenpakets verschiebt.

Das Problem: Man kann nicht einfach die Scheitelpunkte der Wellenpakete vor und nach der Passage vergleichen. Die Differenz zwischen der wahrscheinlichsten Startzeit eines einzelnen Teilchens (wenn sich das Maximum der Glockenkurve bei A befindet) und seiner wahrscheinlichs- ten Ankunftszeit (wenn es B erreicht) sagt nichts über die individuelle Reisezeit aus. Denn ein bei B lokalisiertes Objekt muss nicht unbedingt exakt bei A losgeflogen sein. Es kann seinen Weg irgendwo in der Wahrscheinlichkeits- verteilung um A begonnen haben, insbesondere in dem näher an der Wand gelegenen Arm. Dadurch wäre es eher bei B.

Da die genauen Bahnen der Teilchen nicht bekannt sind, suchten die Forscher nach einem Ansatz, der die statisti- schen Gegebenheiten umfänglicher berücksichtigt. Etwa die Tatsache, dass nach dem Aufprall eines Wellenpakets auf ein Hindernis das Teilchen in jedem Moment eine gewisse Chance hat, sich innerhalb der Barriere zu befin- den. Die Physiker summieren dann über die Wahrschein- lichkeiten zu allen Zeitpunkten und leiten daraus die durch- schnittliche Tunnelzeit ab.

Für die Messung der Wahrscheinlichkeiten selbst haben Theoretiker seit den späten 1960er Jahren verschiedene Gedankenexperimente konzipiert. Sie alle sollten an die Teilchen so etwas wie Uhren koppeln. Diese ticken nur, wenn sich das Objekt in der Barriere befindet. Die Uhren vieler hindurchgelaufener Teilchen zeigen daraufhin eine

Reihe unterschiedlicher Dauern an, und der Durchschnitt liefert den eigentlichen Wert der Tunnelzeit. Das war leichter gesagt als getan. Steinbergs Kollege Ramón Ramos, Hauptautor der gemeinsamen Veröffentlichung, resümiert: »Es gab jede Menge verrückter Ideen, wie man den Vorgang im Prinzip messen könnte, aber alle dachten, das würde nie tatsächlich klappen. Seither hat die Wissenschaft Fortschritte gemacht, und wir konnten das Experiment Wirklichkeit werden lassen.«

Bereits in den 1980er Jahren ermittelten Physiker Tunnelzeiten. Der jüngste Aufschwung ultrapräziser Messungen begann allerdings erst 2014 im Labor von Ursula Keller an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Ihr Team bestimmte die Tunnelzeit mit einer Attoclock genannten Uhr. In dieser treffen Elektronen, die von einem Laser aus Heliumatomen herausgeschlagen werden, auf ein sich drehendes Feld. Die Partikel durchtunneln es dann am häufigsten, wenn die Attoclock in Zwölf-Uhr-Stellung ist. Sobald die Teilchen auf der anderen Seite der rotierenden Barriere austreten, fliegen sie in eine Richtung, die von der Orientierung der Attoclock in diesem Moment abhängt. Um die Tunnelzeit zu messen, errechnete Kellers Team die Differenz zwischen der Zwölf-Uhr-Stellung und dem Winkel, unter dem die meisten Elektronen austreten. Die Forscher kamen auf eine Differenz von 50 Attosekunden, das sind Milliardstel einer milliardstel Sekunde.

In einer 2019 publizierten Arbeit verbesserte Litvinyuks Gruppe Kellers Attoclock-Experiment, indem die Physiker statt Helium die einfacher aufgebauten Wasserstoffatome verwendeten. Sie maßen eine noch kürzere Zeit von höchstens zwei Attosekunden. Das Tunneln geschieht somit fast augenblicklich.

Doch laut einige Experten liefert das Prinzip keine gute Näherung für die Tunnelzeit. Luiz Manzoni veröffentlichte 2019 eine Analyse dazu und hält den Ansatz für ähnlich problematisch wie Hartmans Herangehensweise: Den Elektronen, die allem Anschein nach instantan durch die Barriere schlüpfen, kann man im Nachhinein einen entsprechenden Vorsprung zuschreiben.

Quantenkreisel als Uhrzeiger

In dieser Hinsicht ist das Experiment, das Steinbergs Gruppe in Toronto parallel entwickelt hat, überzeugender. Der Ansatz macht sich die Tatsache zu Nutze, dass viele Teilchen einen inhärenten magnetischen Drehsinn besitzen, der Spin genannt wird. Wenn man den Spin eines Quantenobjekts bestimmt, zeigt er stets bloß nach oben oder nach unten. Aber vor der Messung kann er in jede Richtung deuten. Insbesondere kreiselt der Spin auf regelmäßige Weise, wenn sich das Teilchen in einem Magnetfeld befindet, wie der irische Physiker Joseph Larmor 1897 entdeckte. Das Team in Toronto nutzte diese so genannte Präzession als Zeiger einer »Larmor-Uhr«.

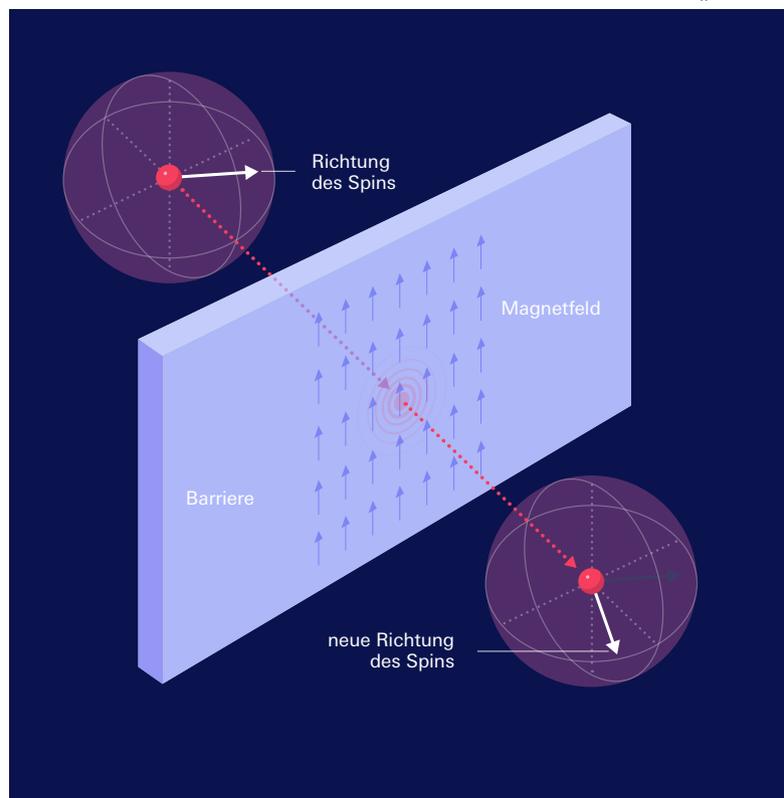
Die Forscher bauten mit einem Laserstrahl eine Barriere, in der sie ein scharf begrenztes Magnetfeld anlegten. Darauf ließen sie Rubidiumatome prallen, deren Spins gezielt in eine bestimmte Richtung zeigten. Dann ermittelten sie den Spin der Atome, die auf der anderen Seite herauskamen (siehe Grafik »Larmor-Uhr«). Jede einzelne

Messung liefert zwar eine wenig erhellende Antwort von entweder »oben« oder »unten«. Führt man das Experiment jedoch immer wieder durch, erhält man einen Durchschnittswert dafür, wie stark sich der Winkel der Spins gedreht hat, während die Atome innerhalb der Barriere waren. Das verrät, wie lange sie typischerweise dort waren.

Den Forschern zufolge befanden sich die Rubidiumatome im Mittel etwa 0,6 Millisekunden in der Wand aus Laserlicht. Die Zeit entspricht der in den 1980er Jahren für eine Larmor-Uhr theoretisch vorhergesagten Spanne, und vor allem ist es weniger, als die Atome benötigt hätten, um durch den leeren Raum zu reisen. Das heißt laut Steinberg: Würde man die Barriere nur dick genug machen, könnten die Atome rascher von einer Seite zur anderen tunneln, als Licht für die gleiche Strecke braucht.

Das ist eigentlich unmöglich, wie bereits Albert Einstein erkannte. Seine Relativitätstheorie lässt keine überlichtschnelle Übertragung von Information zu. Denn das würde bedeuten, »daß wir einen Übertragungsmechanismus für möglich halten müßten, bei dessen Benutzung die erzielte Wirkung der Ursache vorangeht«, wie Einstein 1907 schrieb. Allerdings sind die Experten im Fall des Tunnelleffekts zuversichtlich, dass er die Kausalität nicht aushebelt. Bloß

LARMOR-UHR Ein Atom kann quantenmechanisch eine Wand durchqueren – es tunnelt hindurch. Wirkt in der Barriere ein Magnetfeld, so verändert dieses den Spin des Atoms. Indem Physiker messen, wie stark sich der Spin beim Tunneln dreht, können sie bestimmen, wie lange sich das Atom im Hindernis aufgehalten hat.



gibt es keinen Konsens über die genauen Gründe dafür. »Es fehlt uns noch an einer einheitlichen Herangehensweise«, meint Steinberg. »Das Phänomen an sich ist zwar ein Rätsel, aber kein Paradoxon.«

Einige vernünftig klingende Vermutungen sind jedenfalls unzureichend. Als Manzoni kurz nach der Jahrtausendwende von der Problematik rund um den Tunneleffekt hörte, versuchte er sich zusammen mit einem Kollegen an besseren Berechnungen. Beide Physiker hofften, den Tunnelvorgang auf zulässige Geschwindigkeiten abzubremesen, indem sie relativistische Effekte berücksichtigten, bei denen sich die Zeit für schnellere Teilchen verlangsamt. »Zu unserer Überraschung zeigten sich auch dann überlichtschnelle Vorgänge«, kommentiert Manzoni. »Tatsächlich ist das Problem in der relativistischen Quantenmechanik sogar noch ausgeprägter.«

Fachleuten zufolge ist das überlichtschnelle Tunneln allerdings kein Problem, solange es keine entsprechend schnelle Übertragung von Signalen zulässt. Insofern ähnelt es der »spukhaften Fernwirkung« in der Quantenmechanik, die schon Einstein störte. Das Phänomen bezieht sich auf eine Verschränkung genannte Eigenschaft von Teilchen. Sie verknüpft die Quantenobjekte derart miteinander, dass Messungen an dem einen sofort die Eigenschaften des anderen enthüllen. Doch diese Verbindung zwischen potenziell weit voneinander entfernten Teilchen führt zu keinen wirklich paradoxen Situationen, denn sie kann nicht dazu verwendet werden, Informationen überlichtschnell vom einen Ort zum anderen zu senden.

Trotz unfassbarer Geschwindigkeit zu ineffizient für Datentransfer

Während die Verschränkung unter Physikern lange für Diskussionen sorgte (siehe »Spektrum« Februar 2017, S. 12), gab es um den Tunneleffekt überraschend wenig Aufhebens. »Beim Tunneln hat man es nicht mit zwei getrennten Systemen zu tun, deren Zustände auf gespenstische Weise miteinander verbunden sind«, kommentiert die Wissenschaftsphilosophin Grace Field, die an der University of Cambridge zum erkenntnistheoretischen Umgang mit diesen Themen forscht. »Alles spielt sich in einem einzigen System ab. So betrachtet erscheint es fast noch merkwürdiger als die Verschränkung.«

In einem im September 2020 veröffentlichten Artikel argumentiert Eli Pollak gemeinsam mit seinen Kollegen Randall S. Dumont und Tom Rivlin, dass der Tunneleffekt aus statistischen Gründen keine überlichtschnellen Signale zulässt: Selbst wenn das Tunneln durch eine extrem dicke Barriere schnell passiert, ist die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis an sich außerordentlich gering. Es wäre daher vorteilhafter, Informationen durch den leeren Raum zu senden.

Aber könnte man eine Wand nicht einfach mit einer Unmenge von Teilchen bombardieren, bis eines es tatsächlich überlichtschnell hindurchschafft? Würde das nicht schon ausreichen, um eine Botschaft zu verbreiten und die Gesetze der Physik auszuhebeln? Steinberg befürwortet Pollaks statistische Perspektive und argumentiert, ein einziges tunnelndes Teilchen würde eben noch keine Infor-

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



PETER JURIK / STOCK.ADOBE.COM

mationen übermitteln. Ein sinnvolles Signal benötige Struktur, und solche Details ließen sich auf konventionellem Weg immer besser transportieren als durch eine derart unkooperative Barriere.

»Steinbergs Resultate werden neue theoretische Herangehensweisen beflügeln«, glaubt Pollak. Parallel zu Interpretationen der jüngsten Ergebnisse wird es weitere Experimente geben. Steinberg plant bereits sein nächstes. Dabei wollen er und sein Team das Magnetfeld auf einzelne Regionen innerhalb des Hindernisses beschränken und so »nicht nur herausfinden, wie lange sich das Teilchen insgesamt darin aufhält, sondern auch, wo genau es seine Zeit verbringt«. Theoretischen Berechnungen zufolge halten sich die Rubidiumatome meistens in der Nähe der Wände auf und kaum in der Mitte. »Das ist irgendwie überraschend und überhaupt nicht naheliegend«, findet sein Kollege Ramos.

Indem sie die durchschnittlichen Pfade vieler tunnelnder Teilchen untersuchen, zeichnen die Forscher ein detaillierteres Bild, als es sich die Pioniere der Quantenmechanik jemals hätten ausmalen können. Wie Steinberg betont, rückt das manche Voreingenommenheit gegenüber der meist als seltsam empfundenen Quantenphysik zurecht: »Wenn man feststellt, wo ein Teilchen auftaucht, gibt einem das durchaus Informationen darüber, was es vorher gemacht hat.« ◀

QUELLEN

Dumont, R. S. et al.: The relativistic tunneling flight time may be superluminal, but it does not imply superluminal signaling. *New Journal of Physics* 22, 2020

Landsman, A. S. et al.: Ultrafast resolution of tunneling delay time. *Optica* 1, 2014

Lunardi, J. T., Manzoni, L. A.: Distribution of ionization and tunneling times in a model of strong field ionization. *Journal of Physics: Conference Series* 1391, 2019

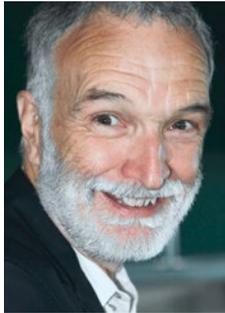
Ramos, R. et al.: Measurement of the time spent by a tunnelling atom within the barrier region. *Nature* 583, 2020

Sainadh, U. S. et al.: Attosecond angular streaking and tunneling time in atomic hydrogen. *Nature* 568, 2019

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Quantum Tunnels Show How Particles Can Break the Speed of Light« 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.

 **Quanta** magazine

SCHLICHTING! WIDERSPENSTIGER KETCHUP



Die Würzsoße ist mal dünn- und mal dickflüssig – je nach mechanischer Einwirkung. Für die variable Konsistenz sind in ihr enthaltene Molekülketten verantwortlich.

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/1823159

Das noch nicht festgelegte Element, das aber fähig ist, sich von außen bestimmen zu lassen

Novalis (1772–1801)

► Ketchup ist bekannt dafür, dass man ihn selbst dann schwer aus der Flasche bekommt, wenn eigentlich noch genügend drin ist. Zwar bleibt bei allen flüssigen Lebensmitteln immer ein Rest im Gefäß kleben, von Rotwein bis Speiseöl. Das liegt an der Benetzbarkeit des Behälters sowie der Zähflüssigkeit der Substanz und betrifft meist nur eine dünne Schicht. Der Ketchup jedoch hängt stets in dicken Lagen an der Innenwand. Bloßes Kippen und sogar Auf-den-Kopf-Stellen befördert nur dann etwas aus dem Hals des Glases heraus, sofern es noch nahezu voll ist. Hingegen lässt sich Ketchup, hat man ihn denn einmal auf dem Teller, leicht verteilen und verstreichen.

Die zähe Tomatensoße verflüssigt sich erst, wenn man die Flasche kräftig schüttelt oder mit der Hand darauf stößt. Passt man nicht auf, landet daraufhin viel mehr auf dem Essen, als man wollte. Erfahrene Konsumenten wissen allerdings, dass es nach dem Rütteln keinen Grund zur Eile gibt, denn die Mobilisierung hält eine gewisse Zeitspanne vor. Man kann anschließend in Ruhe den Deckel öffnen und das Ziel anvisieren.

Dieses lästige Verhalten führt unweigerlich zu der Frage, warum die Lebensmittelhersteller das Problem nicht längst im Griff haben. Die schlichte Antwort lautet: Der Ketchup ist bewusst so designt worden. Nicht um die Konsumenten zu ärgern, vielmehr weil es in den wichtigsten Situationen genau darauf ankommt. Die Tomaten-

soße muss sich in einem dünnen Streifen etwa auf ein Würstchen aufbringen lassen, ohne herunterzurinnen und die Kleidung zu bekleckern – auch dann nicht, wenn man es schwungvoll in den Mund bewegt. Und dort angelangt soll die Würze trotzdem nicht klebrig schmecken, sondern gewissermaßen auf der Zunge zergehen und bei leichten Kaubewegungen keinen Widerstand leisten.

Physikalisch gesehen kommt es beim Schütteln, Verstreichen und Essen zu einer Scherung des Ketchups. Idealisiert bedeutet das: Der untere Teil der im Ruhezustand dickflüssigen Masse liegt auf einem festen Untergrund auf und ist durch Adhäsion oder andere Kräfte fixiert, während die oberen Schichten parallel dazu verschoben werden. Bei normalen »newtonschen« Flüssigkeiten ist die Zähigkeit (Viskosität) unabhängig davon, mit welcher Kraft pro Flächeneinheit sie deformiert werden. Bei »nichtnewtonschen«, zu denen Ketchup gehört, ist das anders: Bei stärkerer Einwirkung verringert Ketchup seine Viskosität. Man spricht daher auch von scherverdünnendem Verhalten.

Verantwortlich dafür sind so genannte Polymere, die der aus Tomatenmark, Zucker und einigen weiteren Substanzen bestehenden Soße in Form eines Verdickungsmittels zugefügt wurden. Polymere sind mikroskopisch gesehen komplexe Moleküle aus langen Atomketten. Sich selbst überlassen, verknäulen sich diese, weil sie dadurch Energie an die Umgebung abgeben. In so einem Zustand erzeugt das Polymer einen relativ breiigen und daher zähen Stoff. Wirken allerdings genügend große Scherkräfte auf ihn, überträgt das die nötige Energie auf die Moleküle, um sie zu strecken und längs auszurichten. Nach der Strukturänderung gleiten die Ketten nunmehr leicht aneinander vorbei. Das



WECHSELHAFT Selbst bei einer vollen Glasflasche bleibt Ketchup leicht im Flaschenhals stecken. Doch fließt er erst einmal heraus, lässt er sich gut auftragen.

äußert sich makroskopisch gesehen in einer geringeren Viskosität.

Nachdem die Scherkräfte nachgelassen haben und der Ketchup sich selbst überlassen ist, verwinden sich die Polymermoleküle unter Abgabe von Energie erneut. Das dauert eine gewisse Zeit und erklärt, warum sich die Soße nach dem Schütteln und dem dadurch bedingten Scheren nicht sofort wieder verfestigt.

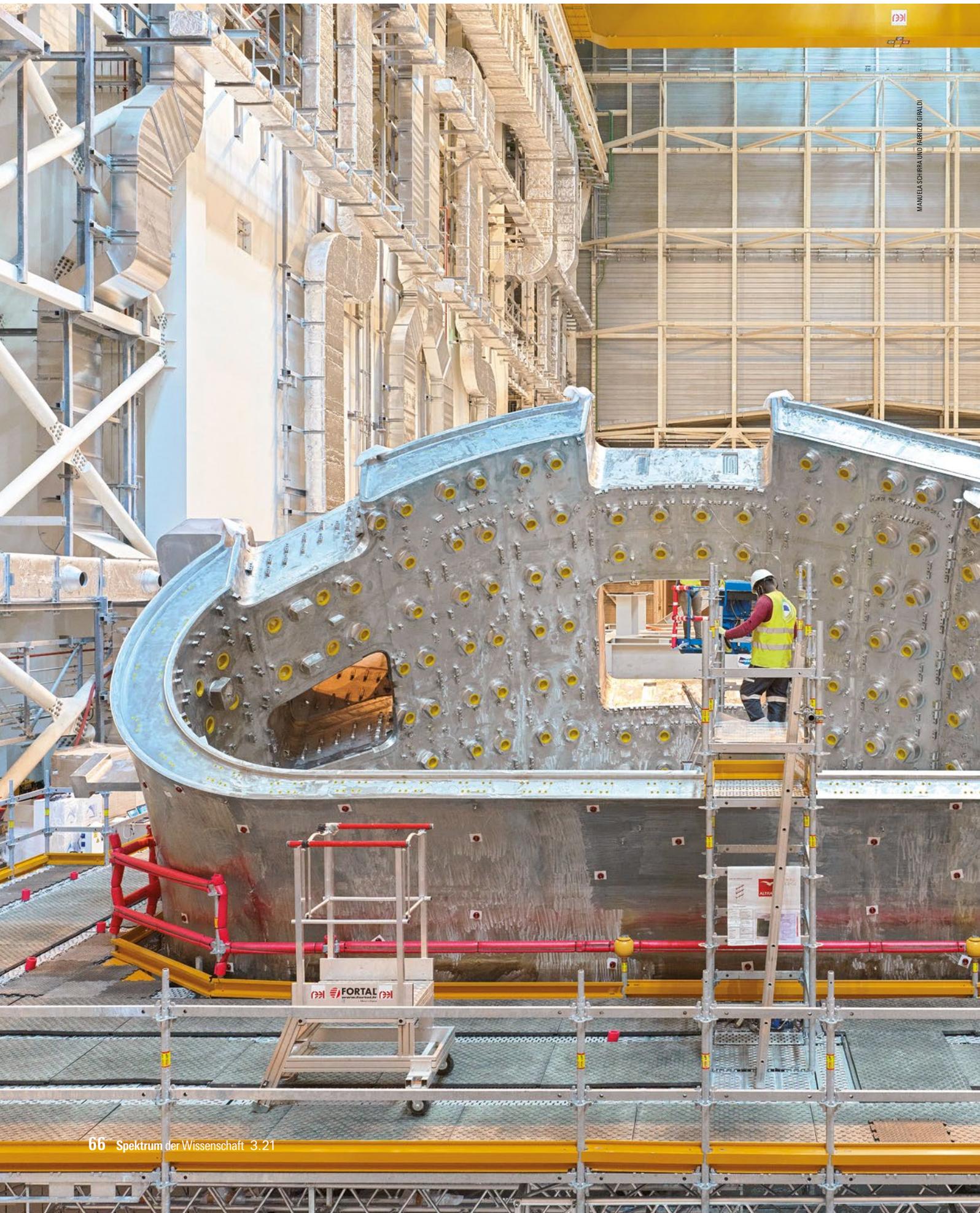
In unserem Alltag begegnen wir weiteren scherverdünnenden Substanzen, beispielsweise Shampoo. Ein Häufchen davon läuft auf der Handfläche so langsam auseinander, dass man es in aller Ruhe auf den Kopf befördern und in den Haaren verteilen kann. Dabei wiederum ist kaum Widerstand zu spüren, weil die Scherung das Fluid verdünnt. Trotz der Gemeinsamkeit mit dem Ketchup besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen

beiden: Das Shampoo zerfließt bereits auf Grund seiner eigenen Schwere, während diese beim Ketchup in den meisten Fällen nicht dafür ausreicht. Ein Streifen davon auf einem Würstchen rührt sich nicht von der Stelle. Auch die zu den nichtnewtonschen Flüssigkeiten gehörenden Wandfarben und Zahncremes verharren dort, wo sie aufgetragen werden.

Wenn es Flüssigkeiten gibt, die ihre Zähigkeit infolge einer scherenden Deformation verkleinern – existieren dann außerdem solche, die dabei ihre Viskosität vergrößern? Tatsächlich ist ein Vertreter einer scherverdickenden Substanz aus dem Haushalt bekannt: mit Wasser zu einer Paste vermengte Speisestärke. Sie lässt sich bei moderaten Geschwindigkeiten relativ bequem verrühren. Sobald das Tempo zunimmt, steigt die Zähigkeit stark an, bis die Mischung schließlich so fest wird, dass der Löffel stecken bleibt.

Das Stärke-Wasser-Gemisch verhält sich ähnlich wie Treibsand, bei dem die Sandkörner unter sanfter Kraftwirkung aneinander vorbeigleiten, weil sie von Wasser geschmiert werden. Plötzlicher Druck verdrängt es aus den Zwischenräumen und presst die festen Bestandteile zusammen, was den Widerstand drastisch erhöht. Wie beim Sand werden auch die Stärkemoleküle von einer Schicht Wasser getrennt. Große Kräfte bringen sie in Kontakt – die Mixtur verklumpt.

Den Ärgernissen mit dem Ketchup ist die Industrie inzwischen auf andere Weise begegnet: Er ist heute in flexiblen Kunststoffflaschen erhältlich. Schon bei leichtem Quetschen erweist sich der Widerstand der Tomatensoße als zwecklos. Das vereinfacht zwar das Handling, die physikalische Herausforderung und der Triumphmoment beim unfallfreien Auftragen gehen jedoch verloren.





PHYSIK

DIE PLASMA-TRAUMFABRIK

Nach vielen Verzögerungen hat 2020 die Montage des ambitionierten Kernfusionsreaktors ITER begonnen. Bilder von der Baustelle zeigen die gewaltige Dimension des Projekts.



Clara Moskowitz ist Physikredakteurin bei »Scientific American«.

► spektrum.de/artikel/1823147

► Der Energiehunger der Menschheit scheint unersättlich. Darum wollen Wissenschaftler seit Jahrzehnten den Prozess nutzen, mit dem die Sonne Energie im Überfluss erzeugt. Der International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) ist das bisher ehrgeizigste Forschungsprojekt, das die Vorgänge in unserem Stern nachstellen soll, bei denen zwei Kerne des Wasserstoffs zu Helium verschmelzen. Im südfranzösischen Kernforschungszentrum Cadarache bauen die Europäische Union, die USA, China, Indien, Japan, Südkorea und Russland gemeinsam an einem über 20 Milliarden Euro teuren Experiment. Die Partner wollen erreichen, was keine Fusionsanlage zuvor geschafft hat: Sie soll mehr Heizleistung produzieren, als hineingesteckt wird.

STÄHLERNE DONUT Techniker arbeiten am ersten Segment des Vakuumgefäßes. Zusammengesetzt soll der Torus mit einem D-förmigen Querschnitt das Plasma einschließen, in dem Atomkerne fusionieren. Dabei stoßen zwei Isotope des Wasserstoffs – Deuterium und Tritium – bei hohen Temperaturen und Geschwindigkeiten aufeinander, verschmelzen und bilden Helium. Dieses ist ein wenig leichter als die Summe der Ausgangskerne. Der Massenunterschied bedeutet nach Albert Einsteins berühmter Gleichung $E = m \cdot c^2$ frei werdende Energie. In einem zukünftigen Fusionskraftwerk soll die so erzeugte Hitze nicht nur die Reaktion weiterer Wasserstoffatome antreiben, sondern außerdem zur Stromerzeugung genutzt werden.

Schon bald nach dem Start des Projekts und der Vertragsunterzeichnung 2006 kam es zu Verzögerungen und empfindlichen Kostensteigerungen. 2013 zog eine externe Evaluation eine so verheerende Bilanz, dass daraufhin das Management umstrukturiert wurde. Zwei Jahre später trat Bernard Bigot als neuer Generaldirektor an. Kritiker halten ITER allerdings weiterhin grundsätzlich für Geld- und Zeitverschwendung, zumal der Reaktor nicht einmal Strom ins Netz speisen, sondern nur die prinzipielle Umsetzbarkeit in einem Kraftwerk demonstrieren soll.

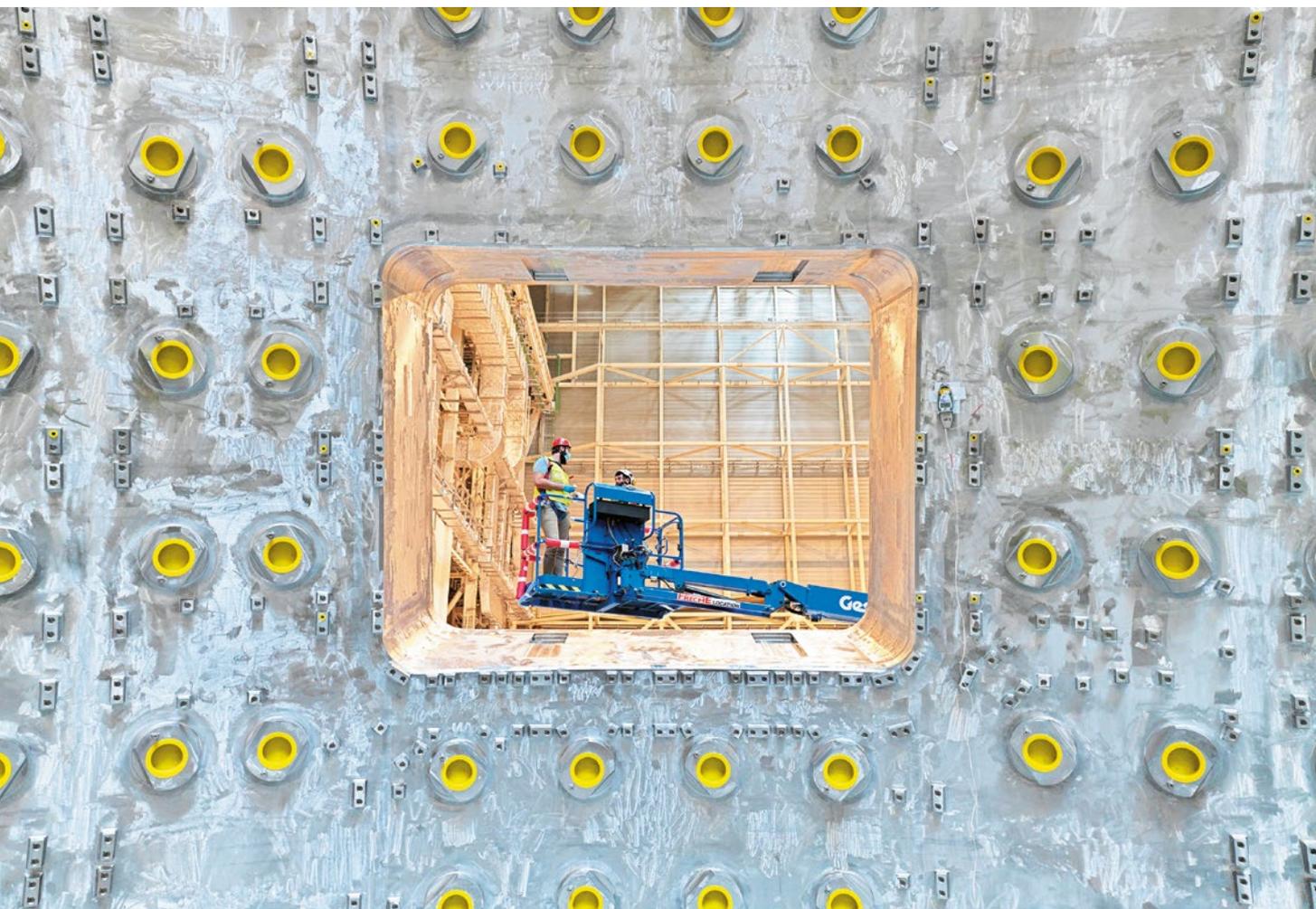
Im Juli 2020 setzte Bigot eine bedeutende Wegmarke, als endlich die Montage des Reaktors startete. Die ersten Bauteile, hergestellt und geliefert von den internationalen Partnerländern, werden jetzt vor Ort zusammengefügt. »Es fühlt sich an wie bei jemandem, der mehrere Marathons laufen muss. Der erste ist geschafft, doch zugleich ist klar, dass viele weitere bevorstehen«, kommentierte Bigot. »Wir blicken nun mit mehr Selbstvertrauen voraus, halten aber weiter nichts für selbstverständlich.«

Die Herausforderung ist wirklich enorm: Die Forscher wollen in ihrem Labor die Miniaturversion eines Sterns bauen und kontrollieren. Das Herzstück des Experiments besteht aus einem 23 000 Tonnen schweren Instrument, in

dem supraleitende Magnete ein 150 Millionen Grad Celsius heißes Plasma einsperren. Es soll dort lange genug für erfolgreiche Fusionsreaktionen stabil bleiben. Alle physikalischen Vorgänge in den Griff zu bekommen, ist extrem anspruchsvoll, und ebenso herkulisch ist die ingenieurtechnische Aufgabe. »Es handelt sich um ein internationales Mammutprojekt, bei dem die Teile überall auf der Welt produziert werden, wie bei einem Puzzle zusammenpassen müssen und am Ende auch noch funktionieren sollen«, fasst die nicht an ITER beteiligte Plasmaphysikerin und Professorin am College of William and Mary in Virginia, Saskia Mordijck, zusammen.

Die ITER-Forscher wollen 2025 den sprichwörtlichen roten Knopf drücken und den Reaktor einschalten. Seine volle Leistungsfähigkeit soll er 2035 erreichen. Sollte alles klappen, würde das einen alten Traum der Physiker greifbar machen. Fusionsenergie könnte mehr Leistung liefern als die Verbrennung fossiler Energieträger und sogar die Kernkraft übertrumpfen, ohne Treibhausgase oder langlebige radioaktive Abfälle zu erzeugen. »Die Kernfusion kann die erneuerbaren Energien optimal ergänzen und eine Lösung für den Klimawandel bringen«, ist Bigot überzeugt. Und fügt hinzu: »Die kommenden drei oder vier Jahre werden jetzt entscheidend sein.« ◀

TEMPERATUREXTREME Am ITER wird sich auf der inneren Seite des Vakuumgefäßes 150 Millionen Grad heißes Plasma befinden, während die außen liegenden Magnete auf vier Grad über den absoluten Temperaturnullpunkt heruntergekühlt sind. Beide trennt lediglich ein »Blanket« aus Beryllium. Diese schützende Hülle soll energiereiche Teilchen abfangen. Die austauschbaren Blanket-Module werden an Stützen befestigt, die noch durch gelbe Kappen vor Verunreinigungen geschützt sind.





MANUELA SCHIRRA UND FABRIZIO GIRALDI



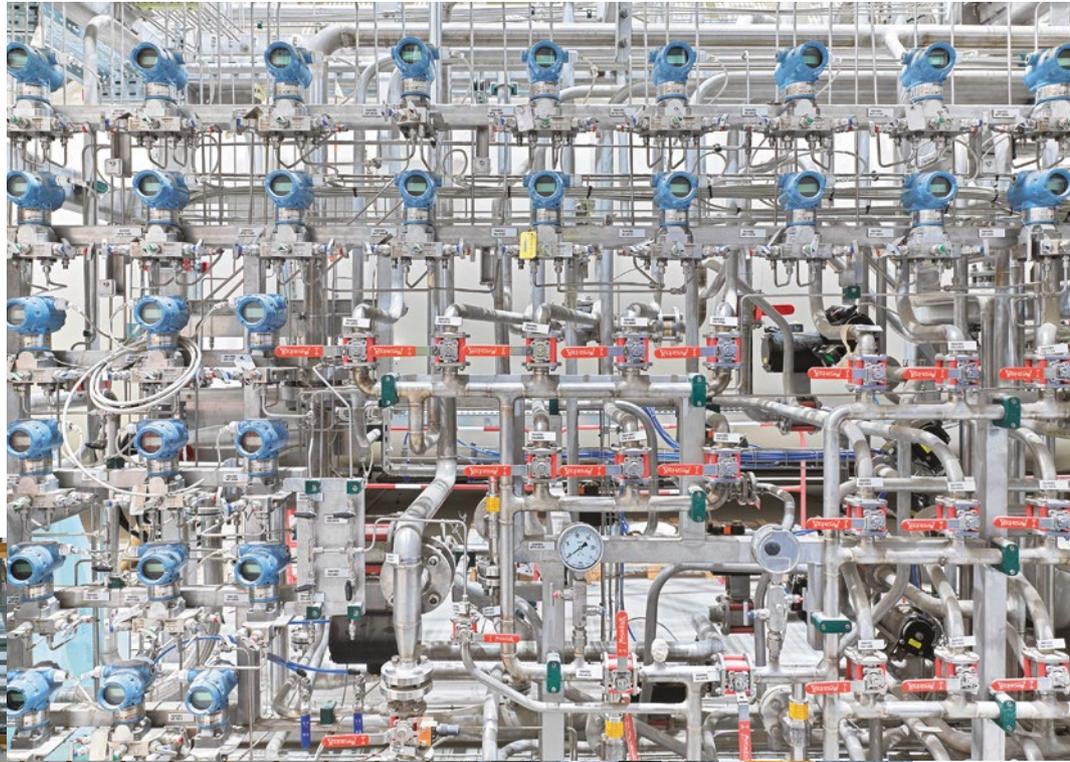
SCHATZKAMMER Der Tokamak-Komplex ist die zylinderförmige Halle rund um das Experiment. Das Wort »Tokamak« ist die Transkription der russischen Abkürzung für »toroidale Kammer mit Magnetspulen«, ein in den 1950er Jahren entwickeltes Konzept. Der ITER-Tokamak wird der gewaltigste je konstruierte sein, mit dem doppelten Radius des bisherigen Rekordhalters. Im Juli 2020 hat ein Brückenkran (oben) die ersten Bauteile in die tiefer gelegenen Bereiche der Halle (unten) abgesenkt, womit die Montage des Tokamak offiziell beginnen konnte.



MANUELA SCHIRRA UND FABRIZIO GRALDI

DONUTSTÜCK Das Vakuumgefäß besteht aus sechs stählernen Segmenten, die in Südkorea und Italien gefertigt wurden. Sie kamen per Schiff in einen Hafen nahe Marseille und bewältigten die letzten 100 Kilometer über Straßen. In der Halle montieren Techniker unter anderem kleinere Magnetspulen und Blanket-Module ins Innere der Gefäßwände sowie große Feldspulen an die Außenseite, bevor die Segmente an ihren Platz gestellt werden.

TIEFSTGEKÜHLT Die leistungsfähigen supraleitenden Magnetspulen funktionieren nur bei extrem niedrigen Temperaturen. Als Kühlmittel dient flüssiges Helium, das durch ein komplexes System von Pumpen und Kanälen befördert wird. Mit Hilfe zahlreicher Handventile lassen sich lokale Temperaturen, Drücke und Flussraten im Kreislauf justieren. Bei ihrer Fertigstellung wird die Heliumkühlanlage die größte der Welt sein.



MAGNETKÄFIG Diverse Spulen halten das Plasma gefangen und in Form. Dazu gehören so genannte poloidale Magnete, die den Torus an sechs Stellen horizontal umringen. Eine solche Spule ist hier abgebildet. Hinzu kommen 18 toroidale Magnete in vertikaler Richtung, ein zentraler »Solenoid« in der Mitte sowie zahlreiche kleinere Korrekturspulen.

MANUELA SCHIRRA UND FABRIZIO BRADU





MANUELA SCHIRRA UND FABRIZIO CIRACÙ

VOR-ORT-FERTIGUNG Vier der sechs poloidalen Magnete sind die einzigen Komponenten von ITER, die nicht von den Partnernationen hergestellt und geliefert werden können. Denn die gewickelten Spulen mit Durchmessern zwischen 17 und 24 Metern und bis zu 400 Tonnen Masse sind zu groß für einen Transport. Das Foto zeigt eine der beiden Ausnahmen: die kleinere unterste, die aus China stammt. Russland trägt die bauähnliche oberste Spule bei.

MATHEMATIK ORDNUNG IN DEN UNENDLICHKEITEN

Dass unendlich manchmal nicht gleich unendlich ist, sondern sogar noch viel mehr, wissen Forscher schon lange. Seit Jahrzehnten rästelten sie aber über die Größe von bestimmten unendlichen Mengen. Wie sie nun herausgefunden haben, unterscheiden sie sich alle – und man kann sie ordnen.



Martin Goldstern (links) und Jakob Kellner sind Mathematiker an der Technischen Universität Wien.

► spektrum.de/artikel/1823150

SERIE

Unendlichkeiten

Teil 1: Februar 2021

Das fehlende Puzzleteil

Jean-Paul Delahaye

Teil 2: März 2021

Ordnung in den Unendlichkeiten

Jakob Kellner und Martin Goldstern

Teil 3: April 2021

Eine neue Mathematik der Zeit

Natalie Wolchover



UNVORSTELLBARE GRÖSSEN Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Mengen zu vermessen. Einige führen zu unerwarteten Ergebnissen.

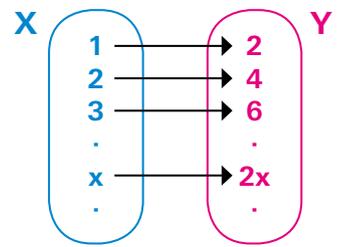
AUF EINEN BLICK DAS UNVORSTELLBARE VERMESSEN

- 1** Selbst wenn Mengen unendlich viele Elemente enthalten, können sich ihre Größen unterscheiden.
- 2** Mathematiker haben zehn unendliche Mengen definiert, die spannende Eigenschaften von reellen Zahlen charakterisieren, konnten sie bislang aber nicht genau vermessen.
- 3** Wie sich herausstellt, sind die zehn Mengen in bestimmten Fällen alle verschieden und lassen sich der Größe nach ordnen.

► Einfache mathematische Konzepte wie das Zählen scheinen in der natürlichen Denkstruktur fest verankert. Wie Studien belegen, verfügen offenbar selbst sehr junge Kinder und Tiere in beschränktem Maß über solche Fähigkeiten. Das ist nicht überraschend, denn das Zählen ist evolutionär gesehen äußerst nützlich – zum Beispiel hilft es abzuschätzen, ob eine verfeindete Gruppe größer als die eigene ist und ob sich ein Angriff oder eher ein Rückzug lohnt.

In den letzten Jahrtausenden hat die Menschheit diese Konzepte auf bemerkenswerte Weise weiterentwickelt: Beginnend mit dem Umgang mit einer Hand voll Objekten stellte man fest, dass sich die Methodik problemlos auf völlig andere Größenordnungen anwenden lässt. Schon bald entstand ein mathematisches Gerüst, mit dem man sowohl riesige Größen wie die Entfernung von Galaxien

BIJEKTION Um die Größen zweier Mengen miteinander zu vergleichen, kann man eine Abbildung, eine so genannte Bijektion suchen, die jedem Element der einen Menge eines aus der anderen zuordnet.



oder die Anzahl der Elementarteilchen im Universum beschreiben kann, als auch die kaum fassbaren Distanzen im Mikrokosmos, von Atomen bis hin zu Quarks.

Wir können sogar mit Zahlen hantieren, die alles übersteigen, was nach heutigem Wissen für die Beschreibung des Universums relevant ist: So lässt sich problemlos 10^{100}

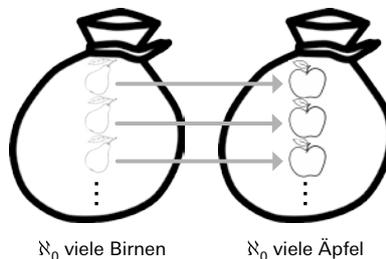
Äpfel und Birnen

Um herauszufinden, ob ein Sack mit Äpfeln genauso viel Obst enthält wie einer mit Birnen, kann man die einzelnen Früchte zählen. Es gibt aber auch eine andere Methode, um zu das zu prüfen: Man ordnet jedem Apfel eine Birne zu. Wenn es am Ende genau aufgeht und kein Obst mehr übrig ist, dann gibt es in jedem Sack gleich viele Früchte.

Würde man einen Apfel aufessen, dann gäbe es weniger Äpfel als Birnen, die zuvor geschilderte Zuordnung würde nicht mehr funktionieren. Das ist allerdings nur im Endlichen der Fall. Hat man einen Sack mit unendlich vielen Äpfeln, enthält er, nachdem man eine Frucht verspeist hat, immer noch genauso viel Obst. Die ursprüngliche Bijektion funktioniert zwar nicht mehr, aber es gibt eine neue Abbildung.

Erstaunlicherweise fallen einige Berechnungen im Unendlichen einfacher aus als im vertrauten Endlichen. Zum Beispiel ist die Vereinigung zweier unendlicher Mengen X und Y genauso groß wie die größere der beiden. Für endliche Mengen gilt das dagegen nicht: Vereinigt man etwa $\{1, 2\}$ mit $\{5, 6\}$ erhält man eine Menge mit vier Elementen. Viele Eigenschaften und Konzepte, die man aus dem Endlichen kennt, sind im Unendli-

chen nicht mehr gültig. Doch einige Sätze lassen sich glücklicherweise ins Unendliche übertragen: Sind A und B gleich groß und B und C ebenso, dann auch A und C. Ist A kleiner/gleich B und B kleiner/gleich C, dann ist A kleiner/gleich C. Zudem sind A und B gleich groß, wenn A kleiner/gleich B und B kleiner/gleich A.



MARTIN GOLUSTERN UND JAKOB KEILNER

Die ersten beiden Punkte lassen sich recht einfach beweisen, aber die dritte Eigenschaft, die auf den ersten Blick offensichtlich erscheint, gestaltet sich etwas schwieriger. Denn kleiner/gleich beschreibt in der Mengenlehre eine Abkürzung für einen komplizierten Sachverhalt, der sich nicht bloß als kleiner oder gleich definieren lässt. Deshalb fällt der Beweis deutlich komplexer aus, wie man an den Arbeiten der deutschen Mathematiker Ernst Schröder und Felix Bernstein aus den 1890er Jahren sehen kann.

Ist es denn immer möglich, zwei Mengen A und B miteinander zu vergleichen? Anders gefragt: Gilt stets entweder $|A| \leq |B|$ oder $|B| \leq |A|$? Um zu beweisen, dass das tatsächlich der Fall ist, kann man wie folgt vorgehen. Man nimmt aus beiden Mengen je ein erstes Element heraus. Anschließend entfernt man je ein weiteres. Das wiederholt man immer weiter, bis einer der folgenden Fälle eintritt: Beide Restmengen sind leer, dann liefert der beschriebene Prozess eine Zuordnung. Dem ersten entfernten Element von A weist man das erste von B zu und so weiter.

Andererseits könnte bloß eine der beiden Mengen (etwa die aus A entstandene) leer sein, die andere aber nicht. Dann gibt es eine Zuordnung von A zu einer Teilmenge von B, somit ist $A \leq B$. Daher sind zwei Mengen immer vergleichbar.

Auch wenn die Idee recht simpel klingt, ist es etwas schwieriger, den Beweis formal zu führen, wie es erst Ernst Zermelo 1904 gelang. Man braucht dabei unter anderem den Begriff der Wohlordnung, der regelt, welches Element der betrachteten Mengen als Nächstes entfernt wird, sowie das so genannte Auswahlaxiom, um zu beweisen, dass es die gewünschte Wohlordnung gibt.

(eine Eins gefolgt von 10^{100} Nullen, wobei 10^{100} 100 Nullen hat) niederschreiben und allerlei Rechnungen damit durchführen. Würde man sie allerdings in der üblichen Dezimalschreibweise darstellen, bräuchte man dafür mehr Elementarteilchen als vermutlich im Universum existieren, selbst wenn man pro Ziffer nur ein Partikel verwendet. Denn Physiker schätzen, dass unser Kosmos weniger als 10^{100} Teilchen enthält.

Aber selbst solche unvorstellbar großen Zahlen sind verschwindend gering verglichen mit unendlichen Mengen, die seit mehr als 100 Jahren einen wesentlichen Teil der Mathematik ausmachen. Mit dem einfachen Zählen von Objekten entsteht die Menge der natürlichen Zahlen, $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$, die vielen in der Schule begegnet. Doch bereits dieses vermeintlich simple Konzept scheint problematisch: Es gibt keine größte natürliche Zahl, man kann stets weiterzählen und ein größeres Element finden.

Können unendliche Mengen überhaupt existieren? Im 19. Jahrhundert führte die Frage zu vielen Streitigkeiten. Aus philosophischer Sicht lässt sich darüber immer noch diskutieren, in der Mathematik hat es sich dagegen durchgesetzt, die Existenz unendlicher Mengen zu postulieren, das heißt als Grundaussage, die keines Beweises bedarf, anzunehmen (ein so genanntes Axiom).

In der Mengenlehre begnügt man sich nicht, Mengen zu beschreiben. So wie man in der Arithmetik lernt, Zahlen miteinander zu verknüpfen, etwa über Addition oder Multiplikation, lassen sich auch Rechenoperationen für Mengen definieren. Zum Beispiel kann man sie vereinigen (aus $\{1, 2\}$ und $\{2, 3, 4\}$ wird $\{1, 2, 3, 4\}$) oder schneiden (aus $\{1, 2\}$ und $\{2, 3, 4\}$ wird $\{2\}$) oder, etwas aufregender, die Potenzmengen bilden: die Familie aller Teilmengen einer Menge.

Größenvergleiche von Mengen

Die Potenzmenge $P(X)$ einer kleinen endlichen Menge X lässt sich einfach berechnen. Für $\{1, 2\}$ erhält man etwa: $P(\{1, 2\}) = \{\emptyset, \{1, 2\}, \{1\}, \{2\}\}$. Doch $P(X)$ wächst für größere X rapide an; so haben zehnelementige Familien $2^{10} = 1024$ Teilmengen. Wenn man die Potenzmenge einer unendlichen Menge bilden möchte, fordert das unsere Vorstellungskraft stark heraus. Zum Beispiel enthält die Potenzmenge der natürlichen Zahlen \mathbb{N} die leere Menge, \mathbb{N} selbst, die Menge aller geraden Zahlen sowie der Primzahlen, die Menge aller Zahlen mit Ziffernsumme 2021, $\{12, 17\}$ und noch ungeheuer viele andere. Wie sich herausstellt, übersteigt die Anzahl ihrer Elemente den Umfang der natürlichen Zahlen.

Um zu verstehen, was das bedeutet, muss man erst einmal klären, wie die Größe von Mengen definiert ist. Für den endlichen Fall kann man die jeweiligen Elemente zählen, so sind etwa $\{1, 2, 3\}$ und $\{\text{Cantor, Gödel, Cohen}\}$ gleich groß. Möchte man Mengen mit zahlreichen – aber endlich vielen – Elementen vergleichen, gibt es zwei bewährte Möglichkeiten. Man kann zum einen alle darin enthaltenen Objekte zählen. Manchmal ist es allerdings einfacher, eine Zuordnung zwischen den Mengen zu finden: Lässt sich beispielsweise jedes Element der einen eindeutig einem Element der anderen zuweisen (etwa $1 \rightarrow \text{Cantor}$, $2 \rightarrow \text{Gödel}$, $3 \rightarrow \text{Cohen}$), dann sind die zwei Mengen gleich groß.

Glossar

Teilmenge: Eine Menge A heißt Teilmenge von B , wenn jedes Element von A auch in B liegt.

Nullmenge: eine Menge mit Maß (zum Beispiel Flächeninhalt oder Volumen) null

Magere Menge: abzählbare Vereinigung von Rändern

\aleph_0 : Größe der natürlichen Zahlen; abzählbar unendlich. Die nächstgrößere Unendlichkeit ist \aleph_1 , danach kommt \aleph_2 und so weiter.

2^{\aleph_0} : Kontinuum, Größe der reellen Zahlen

\mathcal{N} : die Familie der Nullmengen

\mathcal{M} : die Familie der mageren Mengen

non(\mathcal{N}): die kleinste Kardinalzahl einer Nichtnullmenge

non(\mathcal{M}): die kleinste Kardinalzahl einer nicht mageren Menge

add(\mathcal{N}): die kleinste Anzahl von Nullmengen, deren Vereinigung eine Nichtnullmenge ist

add(\mathcal{M}): die kleinste Anzahl von mageren Mengen, deren Vereinigung eine nicht magere Menge ist

cov(\mathcal{N}): die kleinste Anzahl von Nullmengen, die vereinigt die ganze Ebene ergeben

cov(\mathcal{M}): die kleinste Anzahl von mageren Mengen, die vereinigt die ganze Ebene ergeben

cof(\mathcal{N}): die kleinstmögliche Größe einer Basis der Familie der Nullmengen

cof(\mathcal{M}): die kleinstmögliche Größe einer Basis der Familie der mageren Mengen

Basis X von \mathcal{N} bzw. \mathcal{M} : eine Menge X von Null- beziehungsweise mageren Mengen, so dass es für jede Null- beziehungsweise magere Menge A eine Menge B in X gibt mit $A \subseteq B$

b: die kleinste Größe einer Menge D von stetigen Funktionen, so dass jede stetige Funktion von einer Funktion aus D dominiert wird

δ : die kleinste Größe einer Familie B von stetigen Funktionen mit der Eigenschaft, dass es keine stetige Funktion gibt, die alle Funktionen aus B dominiert

Letztere Methode ist bei unendlichen Mengen nützlich. Um diese Objekte zu vermessen, schlägt man einen anderen Weg ein als im Endlichen. Anstatt den Begriff der Anzahl als grundlegend anzusehen und daraus Konzepte wie »ist größer«, »ist gleich groß« oder »ist größer oder gleich« abzuleiten, verfolgt man eine umgekehrte Strategie: Man definiert zuerst, wann zwei Mengen A und B gleich groß sind, nämlich genau dann, wenn man jedem Element aus A genau eines aus B zuordnen kann. Eine solche Abbildung bezeichnet man als Bijektion.

Zudem ist A kleiner/gleich B, falls die Zuordnung alle Elemente von B höchstens einmal verwendet. Damit kann man die Größe von Mengen durch so genannte Kardinalzahlen beschreiben. Im Endlichen sind das wie gewohnt die natürlichen Zahlen. Für unendliche Mengen sind sie hingegen abstrakte Größen, die sich durchaus voneinander unterscheiden können: Denn nicht immer existiert eine Bijektion zwischen unendlichen Mengen.

Eine solche Definition von Größe führt zu scheinbaren Widersprüchen, die Bernard Bolzano in seinen 1851 posthum erschienenen »Paradoxien des Unendlichen« aufführte. Zum Beispiel wirkt die Aussage »der Teil ist stets kleiner als das Ganze« auf den ersten Blick selbstverständlich. Das heißt, wenn eine Menge A eine echte Teilmenge von B ist (also jedes Element von A in B ist, B aber weitere Elemente enthält), dann muss A kleiner als B sein. Das gilt jedoch nicht für unendliche Mengen! Diese seltsame Eigenschaft war einer der Gründe dafür, dass das Konzept von Unendlichkeiten bei einigen Gelehrten vor mehr als 100 Jahren auf Ablehnung stieß.

Zum Beispiel sind die geraden Zahlen $G = \{0, 2, 4, 6, \dots\}$ eine echte Teilmenge der natürlichen Zahlen $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$.

Normale Zahlen

Viele mathematische Sätze gelten für fast alle Zahlen – bis auf eine Nullmenge. Zum Beispiel sind »fast alle« reellen Zahlen x normal, das heißt jeder mögliche endliche Zahlenblock taucht in den Nachkommaziffern der Dezimaldarstellung von x gleich häufig auf. Wenn eine Zahl also normal ist, dann kommt die Acht ebenso wie die Neun in zehn Prozent der Nachkommastellen vor, der Block 73 genauso wie 99 in einem Prozent aller Paare aufeinander folgender Ziffern und so weiter.

Natürliche oder rationale Zahlen sind nicht normal, denn sie sind stets periodisch. Mit einem zentralen Resultat der Wahrscheinlichkeitstheorie, dem »Gesetz der großen Zahlen«, lässt sich jedoch schnell zeigen, dass »fast alle« Zahlen (bis auf eine Nullmenge) normal sind. Möchte man allerdings herausfinden, ob eine konkrete reelle Zahl normal ist, gestaltet sich das häufig schwierig. Bis heute weiß man beispielsweise nicht, ob die Kreiszahl π oder die Eulersche Zahl e normal sind.

Maße

Das Konzept des Maßes lässt sich gut anhand des Quadrats mit Seitenlänge eins veranschaulichen. Wenn eine Teilmenge B des Quadrats das Maß 0,13 hat und man zufällig einen Dartpfeil auf die gesamte Fläche wirft, dann trifft man B mit einer Wahrscheinlichkeit von 13 Prozent. Die Menge der Punkte unterhalb der Diagonale hat die Fläche ein halb, und wird daher mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit getroffen.

Eine Nullmenge (wie die unendlich dünne Diagonale oder ein einziger Punkt) erreicht man dagegen mit einer Wahrscheinlichkeit von null. Natürlich landet ein Dartpfeil aber stets irgendwo in dem Quadrat, das überabzählbar viele Punkte umfasst. Daraus kann man sehen, dass die Vereinigung von überabzählbar vielen Nullmengen im Allgemeinen keine Nullmenge mehr ist – man trifft ja das Quadrat (die Vereinigung der einzelnen Punkte) mit einer Wahrscheinlichkeit von eins.

Rein intuitiv würde man wohl sagen, die Menge G sei halb so groß wie \mathbb{N} . Dennoch sind ihre Kardinalzahlen nach der zuvor angegebenen Definition gleich groß: Denn man kann jeder Zahl g in G genau eine in \mathbb{N} zuordnen ($0 \rightarrow 0, 2 \rightarrow 1, 4 \rightarrow 2, \dots, g \rightarrow g/2, \dots$).

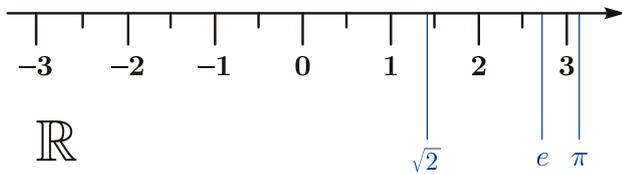
Als Konsequenz könnte man entweder den Begriff der Größe für Mengen als unsinnig verwerfen – oder man gibt ihm einen anderen Namen, etwa Mächtigkeit. Der Einfachheit halber behalten wir die Wortwahl bei, auch wenn sie im Unendlichen unerwartete Folgen hat.

Der deutsche Logiker und Begründer der modernen Mengenlehre, Georg Cantor, fand im 19. Jahrhundert heraus, dass nicht alle unendlichen Mengen gleich groß sind. Wie er bewies, ist die Potenzmenge $P(X)$ einer – endlichen oder unendlichen – Menge X stets größer als X selbst. Daraus folgt unter anderem, dass keine größte Unendlichkeit existiert und damit auch keine »Allmenge«, die alle Mengen enthält.

Eine ungelöste Vermutung

Dafür gibt es so etwas wie eine kleinste Unendlichkeit: Alle unendlichen Mengen sind größer oder gleich den natürlichen Zahlen. Man nennt Mengen X, die so groß sind wie \mathbb{N} (mit einer Bijektion zwischen \mathbb{N} und X) abzählbar, ihre Kardinalzahl heißt \aleph_0 . Zu jeder unendlichen Kardinalzahl \aleph_a gibt es eine nächstgrößere, \aleph_{a+1} . Nach der kleinsten unendlichen Kardinalzahl \aleph_0 kommt also \aleph_1 , gefolgt von \aleph_2 und so weiter. Die reellen Zahlen sind genauso groß wie die Potenzmenge von \mathbb{N} ; ihre Kardinalzahl bezeichnet man mit 2^{\aleph_0} oder Kontinuum.

In den 1870er Jahren fragte sich Cantor, ob die Menge der reellen Zahlen \mathbb{R} die nächstgrößere nach den natürlichen Zahlen ist – anders ausgedrückt, ob $\aleph_1 = 2^{\aleph_0}$. Bis dahin



DAS KONTINUUM Die reellen Zahlen sind alle Zahlen, die man auf einem Zahlenstrahl findet. Prominente Vertreter sind die Eulersche Zahl e und die Kreiszahl π .

stellte sich jede unendliche Teilmenge von \mathbb{R} entweder als genauso groß wie \mathbb{N} oder \mathbb{R} selbst heraus. Das veranlasste Cantor zur so genannten Kontinuumshypothese: Er vermutete, die Größe von \mathbb{R} sei die kleinstmögliche überabzählbare Kardinalzahl. Jahrzehntlang beschäftigte die Vermutung zahlreiche Mathematiker, doch ein Beweis entzog sich ihnen. Wie sich später herausstellte, waren ihre Versuche zwangsläufig zum Scheitern verurteilt.

Die Mengenlehre ist zwar extrem mächtig, fast alle mathematischen Konzepte und Probleme lassen sich durch sie formalisieren, aber sie hat auch Schwachstellen. Das

Fundament dieser Disziplin bildet das vor über 100 Jahren vom deutschen Logiker Ernst Zermelo formulierte und von seinem deutsch-israelischen Kollegen Abraham Fraenkel ergänzte Axiomensystem, ZFC genannt (C steht dabei für das Auswahlaxiom, englisch: axiom of choice). Es handelt sich um eine Sammlung von Grundannahmen, mit der sich fast die gesamte Mathematik betreiben lässt – nur ein verschwindend geringer Anteil benötigt zusätzliche Annahmen. Doch der österreichische Mathematiker Kurt Gödel erkannte 1931 einen grundlegenden Makel des Systems: Die Theorie ist unvollständig. Das heißt, man kann Aussagen formulieren, die sich mit den Mitteln von ZFC weder widerlegen noch beweisen lassen. Unter anderem ist es unmöglich, innerhalb eines Systems zu zeigen, dass dieses zu keinerlei Widersprüchen führt (siehe »Axiomatisierung der Mengenlehre«).

Das berühmteste Beispiel für einen unentscheidbaren Satz in der Mengenlehre ist die Kontinuumshypothese. In einer 1938 erschienenen Arbeit bewies Gödel, dass man Cantors Vermutung innerhalb von ZFC nicht widerlegen kann. Wie der US-amerikanische Mathematiker Paul Cohen 25 Jahre später zeigte, lässt sie sich mit den Mitteln von ZFC ebenso wenig beweisen. Daher wird man mit

Axiomatisierung der Mengenlehre

Der mengentheoretischen Intuition nach sollte man beliebige mathematische Objekte zu einer Menge zusammenfassen können. Das führt aber rasch auf einen Widerspruch, das so genannte Russell-Paradoxon. Ein Beispiel dafür ist ein Barbier, der alle Dorfbewohner rasiert, die sich nicht selbst rasieren. Soll er sich nun selbst rasieren oder nicht? Was immer er tut, er widerspricht der Anforderung. So einen Barbier kann es also nicht geben. Ebenso existiert keine Menge, die alle Mengen umfasst, die sich nicht selbst enthalten.

Das Axiom »Jede mathematische Eigenschaft definiert eine Menge jener Elemente, welche die Eigenschaft erfüllen« ist daher widersprüchlich. Bei der Formulierung der Axiome, aus denen man dann weitere Eigenschaften herleiten kann, muss man vorsichtig vorgehen – man kann nicht alles zulassen.

Die Mengenlehre baut deshalb auf Grundannahmen auf, die nur für gewisse Eigenschaften E die

Existenz einer solchen Menge fordern. Ein Beispiel ist das Paar-mengenaxiom: Für alle Objekte x, y gibt es eine Menge, die sowohl x als auch y enthält, und sonst nichts. Oder das Potenzmengenaxiom: Für jede Menge X gibt es eine Menge Y , so dass alle Teilmengen von X Elemente von Y sind – und sonst nichts. Eine andere wichtige Grundannahme ist das Unendlichkeitsaxiom, das die Existenz unendlicher Mengen garantiert. Diese und weitere Axiome bilden das Fundament der Mengenlehre, ZFC, benannt nach Ernst Zermelo und Abraham Fraenkel, wobei C für das Auswahlaxiom (englisch: axiom of choice) steht.

ZFC bietet also eine formale Grundlage für die gesamte Mathematik. Aber woher weiß man, ob die damit abgeleiteten Sätze wirklich wahr sind? Oder könnte man sogar irgendwann auf einen Widerspruch wie $0 \neq 0$ stoßen?

Der bedeutende Mathematiker David Hilbert wollte um 1900 mit Hilfe einer »unverdächtigen« Theo-

rie (deren Axiome zweifelsfrei gelten) beweisen, dass das stärkere ZFC-System konsistent ist. Leider scheitert der Versuch an Gödels Unvollständigkeitssatz (1931): Man kann nicht einmal mit den Mitteln von ZFC beweisen, dass ZFC zu keinen Widersprüchen führt – geschweige denn in schwächeren Systemen.

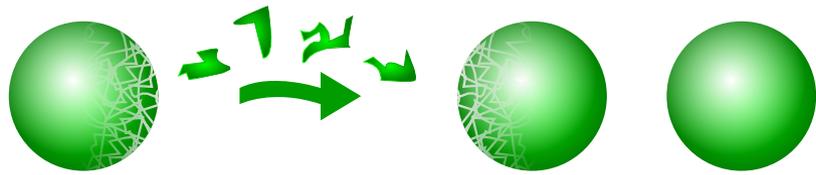
Man kann sich also nicht sicher sein, ob das Fundament der Mathematik konsistent ist. Zwar erscheinen die Axiome den meisten Mengentheoretikern als richtig, aber das schützt nicht vor Irrtum. Vermutlich würde auch der Satz »Zu jeder Eigenschaft gibt es die Menge aller Objekte, welche die Eigenschaft erfüllen« den meisten Mathematikern als wahr erscheinen, wenn ihnen das Russell-Paradoxon nicht bekannt wäre.

Was würde passieren, falls sich ZFC als inkonsistent herausstellt? Zunächst wahrscheinlich nicht allzu viel: Der überwiegende Teil der Mathematik benötigt nur sehr schwache Fragmente der Theorie.

Auswahlaxiom und Banach-Tarski-Paradoxon

Das Auswahlaxiom kann zu extrem seltsamen Ergebnissen führen. Es besagt, dass es zu jeder Familie von nicht leeren Mengen eine Funktion gibt, die in jeder dieser Mengen ein Element auswählt. Für endliche Familien ist das Axiom offensichtlich wahr, doch im Unendlichen hat es unerwartete Folgen. Eine davon ist das Banach-Tarski-Paradoxon, das mit geometrischen Figuren zusammenhängt.

Zwei ebene Objekte, etwa Dreiecke, sind kongruent, wenn man das eine durch Drehungen, Verschiebungen und Spiegelungen in das andere verwandeln kann. Zum Beispiel sind zwei Halbkreise kongruent, falls sie den gleichen Radius haben. Genauso lässt sich Kongruenz im dreidimensionalen Raum definieren. Das Lebesguemaß (der Flächeninhalt oder das Volumen) ändert sich bei Drehungen, Verschiebungen und Spiegelungen nicht, weshalb kongruente Figuren das gleiche Maß haben.



Eine ähnliche Eigenschaft wie Kongruenz beschreibt die Zerlegungsäquivalenz, wenn man zwei Objekte in endlich viele Teile zerlegen kann, die paarweise kongruent sind. Zum Beispiel lässt sich ein gleichschenkliges Dreieck, mit einer Grundseite von $2a$ und einer Höhe von b , in zwei rechtwinklige Dreiecke mit Katheten a und b teilen.

Mit Hilfe des Auswahlaxioms kann man damit das Banach-Tarski-Paradoxon herleiten: Wenn Figur A aus zwei Kugeln mit Radius eins besteht, die Figur B eine einzige Kugel mit Radius eins ist, dann sind A und B zerlegungsäquivalent. Das heißt, man kann aus einer Kugel mit Radius eins zwei

gleich große – ebenfalls mit Radius eins – konstruieren (siehe Bild)! Das ist auf den ersten Blick widersprüchlich, denn bei einer Zerlegung kann man kein Volumen gewinnen oder verlieren – ebenso wenig wie beim Verschieben, Drehen oder Spiegeln einzelner Teile.

Tatsächlich sind die Objekte, in die man die Kugeln zerteilen muss, aber so kompliziert und ausgefranst, dass man ihnen kein Maß (in diesem Fall: kein Volumen) zuordnen kann, sie sind nicht messbar. Physikalisch hat das Paradoxon keine Relevanz, denn nicht-messbare Größen spielen in der mathematischen Beschreibung der Natur keine Rolle.

den üblichen Axiomen der Mengenlehre niemals eine Antwort auf die Kontinuumshypothese finden. Es bleibt also offen, ob Mengen existieren, die größer als die natürlichen und gleichzeitig kleiner als die reellen Zahlen sind (siehe »Spektrum« Februar 2021, S. 12).

Neben der Kardinalität gibt es andere Methoden, um die Größe einer Menge zu beschreiben. Wenn man sich Mengen beispielsweise geometrisch vorstellt, kann man ihnen eine Länge, einen Flächeninhalt oder ein Volumen zuordnen. Eine Menge von Punkten, die ein Rechteck mit den Seitenlängen a und b bilden, hat beispielsweise eine Fläche von $a \cdot b$. Für kompliziertere Teilmengen der Ebene braucht man manchmal andere Hilfsmittel, um deren Flächeninhalt zu berechnen, etwa die aus der Schule bekannte Integralrechnung. Die Methode reicht aber für bestimmte komplexe Mengen nicht aus. Um diese trotzdem zu vermessen, nutzt man das so genannte Lebesguemaß, eine Funktion, die auch kompliziertesten Objekten eine Länge, Fläche oder ein Volumen zuordnet. Dennoch ist es möglich, Teilmengen der Ebene zu definieren, die überhaupt nicht messbar sind: Sie sind derart ausgefranst, dass eine Vermessung gänzlich scheitert.

Im zweidimensionalen Raum ist eine Linie (etwa ein Kreis, eine endliche Strecke oder eine Gerade) stets messbar, und ihr Flächeninhalt ist null. Man nennt sie daher

Nullmenge. Auch im Eindimensionalen lassen sich Nullmengen definieren: Auf dem Zahlenstrahl hat die Menge zweier Zahlen, etwa $\{3, 5\}$ das Maß null, während ein Intervall wie $[3, 5]$, also die Strecke von 3 nach 5, das Maß zwei hat.

Vernachlässigbare Mengen

Das Konzept der Nullmenge ist in der Mathematik äußerst nützlich: Oft kann man Theoreme nicht allgemein für reelle Zahlen beweisen, aber für alle bis auf eine Nullmenge. Für die meisten Anwendungen genügt das. Dabei können Nullmengen sehr groß erscheinen: Zum Beispiel sind die rationalen Zahlen innerhalb der reellen (also auf dem Zahlenstrahl) eine Nullmenge, selbst wenn es unendlich viele davon gibt. Das liegt daran, dass in diesem Zusammenhang jede abzählbare – oder endliche – Menge eine Nullmenge ist. Umgekehrt muss aber eine Teilmenge der x - y -Ebene mit großer Kardinalität weder messbar sein noch großes Maß haben. Zum Beispiel hat die gesamte Ebene mit ihren 2^{\aleph_0} Elementen das Maß unendlich. Aber die x -Achse mit gleicher Kardinalität hat ein zweidimensionales Maß von null und ist daher eine Nullmenge der Ebene.

Solche vernachlässigbaren Mengen führten zu grundlegenden Fragen über die Größe von zehn unendlichen Kardinalzahlen, die lange Zeit unbeantwortet blieben. Zum

Beispiel wollten Mathematiker herausfinden, wie groß eine Menge mindestens sein muss, damit sie keine Nullmenge ist. Man bezeichnet die Familie aller Nullmengen mit \mathcal{N} und die kleinste Kardinalzahl einer Nichtnullmenge mit $\text{non}(\mathcal{N})$. Für diese Zahl gilt: $\aleph_0 < \text{non}(\mathcal{N}) \leq 2^{\aleph_0}$, denn jede Menge der Größe \aleph_0 ist eine Nullmenge, aber die reellen Zahlen (mit Größe 2^{\aleph_0}) ist keine Nullmenge im eindimensionalen Maß. Damit ergibt sich $\aleph_1 \leq \text{non}(\mathcal{N}) \leq 2^{\aleph_0}$, weil \aleph_1 die erste über-abzählbare Kardinalzahl ist. Wenn man von der Kontinuums-hypothese ausgeht, ist $\text{non}(\mathcal{N}) = 2^{\aleph_0}$, da es in dem Fall keine Kardinalzahl gibt, die zwischen der Größe der natürlichen und der reellen Zahlen liegt.

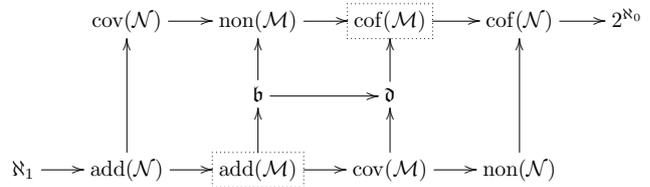
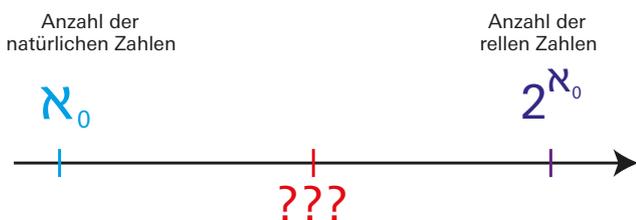
Ähnlich lässt sich eine weitere Kardinalzahl $\text{add}(\mathcal{N})$ definieren, als Antwort auf die Frage: Wie viele Nullmengen muss man mindestens vereinigen, um eine Nichtnullmenge zu erhalten? Diese Zahl ist kleiner oder gleich $\text{non}(\mathcal{N})$. Wenn A eine Nichtnullmenge ist, die $\text{non}(\mathcal{N})$ viele Elemente enthält, ergibt die Vereinigung über alle $\text{non}(\mathcal{N})$ einelementigen Teilmengen von A eben die Nichtnullmenge A . Allerdings könnte eine kleinere Anzahl von Nullmengen genügen (die wären dann nicht einelementig), die vereinigt eine Nichtnullmenge ergeben, deshalb gilt $\text{add}(\mathcal{N}) \leq \text{non}(\mathcal{N})$.

Die Kardinalzahl $\text{cov}(\mathcal{N})$ ist die kleinste Anzahl von Nullmengen, die vereinigt die x - y -Ebene ergeben. $\text{cov}(\mathcal{N})$ ist dabei größer oder gleich $\text{add}(\mathcal{N})$, denn die Ebene ist ja eine Nichtnullmenge.

Ebenfalls interessant ist die Frage nach $\text{cof}(\mathcal{N})$, der kleinstmöglichen Größe einer Basis X von \mathcal{N} . Das ist eine Menge X von Nullmengen, die für jede Nullmenge A eine Menge B enthält, so dass A eine Teilmenge von B ist. Die damit definierten unendlichen Größen $\text{add}(\mathcal{N})$, $\text{cov}(\mathcal{N})$, $\text{non}(\mathcal{N})$ und $\text{cof}(\mathcal{N})$ sind wichtige Kennzahlen, die Eigenschaften von Nullmengen charakterisieren.

Für jede der beschriebenen Kennzahlen lässt sich eine analoge Größe definieren, die zwar ebenfalls reelle Zahlen betrifft, sich aber auf ein anderes Konzept von vernachlässigbaren Mengen bezieht. Denn nicht nur Nullmengen beschreiben einen Begriff von Kleinheit, sondern auch so genannte magere Mengen. Anschaulich handelt es sich dabei um abzählbare Vereinigungen von geschlossenen Rändern (ohne Inneres), etwa von Kreislinien in der Ebene. Im Eindimensionalen bilden die normalen Zahlen (siehe »Normale Zahlen«) eine magere Menge auf dem Zahlenstrahl, während die restlichen reellen, nichtnormalen Zahlen eine Nullmenge bilden.

KONTINUUMSHYPOTHESE Gibt es eine Unendlichkeit zwischen der Größe natürlicher und reeller Zahlen? Die Frage ist in der Mengenlehre unentscheidbar.



CICHOŃ-DIAGRAMM Die Relationen von zwölf Unendlichkeiten sind in dem Diagramm dargestellt, wobei die Pfeile für Kleiner-gleich-Beziehungen stehen.

Ausgehend davon lassen sich entsprechende Kennzahlen für die Familie \mathcal{M} der mageren Mengen definieren: $\text{add}(\mathcal{M})$, $\text{non}(\mathcal{M})$, $\text{cov}(\mathcal{M})$, $\text{cof}(\mathcal{M})$. Unter der Kontinuums-hypothese sind für Null- wie für magere Mengen alle Kennzahlen gleich. Umgekehrt konnten die US-amerikanischen Mathematiker Kenneth Kunen und Arnold Miller 1981 mit Hilfe des von Cohen entwickelten so genannten Forcing zeigen, dass es unmöglich ist, die Aussage $\text{add}(\mathcal{N}) = \text{add}(\mathcal{M})$ mit den Mitteln der ZFC-Axiome zu beweisen. Das heißt, die Anzahl der Null- und mageren Mengen, die man vereinigen muss, um eine nicht vernachlässigbare Menge zu erzeugen, ist nicht beweisbar gleich.

Forcing ist eine Methode, um mathematische Universen zu konstruieren. Damit meint man ein Modell, das alle ZFC-Axiome erfüllt. Um zu zeigen, dass eine Aussage X nicht widerlegbar ist, verwendet man die folgende Tatsache: Wenn es ein Universum gibt, in dem neben ZFC auch X gilt, dann kann man X in ZFC nicht widerlegen – sonst hätte man einen Widerspruch erzeugt.

Mathematische Universen mit erstaunlichen Eigenschaften

Dieser Strategie folgend konstruierten Kunen und Miller ein mathematisches Universum, das sowohl die Axiome von ZFC als auch die Eigenschaft $\text{add}(\mathcal{N}) < \text{add}(\mathcal{M})$ erfüllt. Demnach bräuchte man in diesem Modell mehr magere als Nullmengen, um eine nicht vernachlässigbare Menge zu bilden. Das weist auf eine Asymmetrie zwischen beiden Mengentypen hin, die unter Annahme der Kontinuums-hypothese von Cantor jedoch verschwindet. Das Ergebnis zeigt, dass man unmöglich $\text{add}(\mathcal{N}) \geq \text{add}(\mathcal{M})$ aus ZFC beweisen kann.

Wie der polnisch-amerikanische Mathematiker Tomek Bartoszyński drei Jahre später herausfand, ist hingegen die umgekehrte Ungleichung $\text{add}(\mathcal{N}) \leq \text{add}(\mathcal{M})$ mit den Mitteln von ZFC sehr wohl beweisbar. Man kann daraus allerdings weder auf $\text{add}(\mathcal{N}) = \text{add}(\mathcal{M})$ noch $\text{add}(\mathcal{N}) < \text{add}(\mathcal{M})$ schließen. Es ist genauso wie bei der Kontinuums-hypothese: Es lässt sich lediglich zeigen, dass $\aleph_1 \leq 2^{\aleph_0}$, man kann aber weder beweisen, dass $\aleph_1 < 2^{\aleph_0}$ noch dass $\aleph_1 = 2^{\aleph_0}$ gilt.

Neben den bisher definierten Kardinalzahlen gibt es zwei weitere interessante Größen \mathfrak{b} und \mathfrak{d} , die sich auf die Dominanz von Funktionen reeller Zahlen beziehen. Für zwei stetige Funktionen (von denen es 2^{\aleph_0} viele gibt) f und g sagt man » f wird von g dominiert«, $f < g$, wenn für alle

genügend großen x die Ungleichung $f(x) < g(x)$ gilt. Zum Beispiel dominiert eine quadratische Funktion wie $g(x) = x^2$ jede lineare Funktion, etwa $f(x) = 100x + 30$.

Die Kardinalzahl \aleph ist dabei die kleinstmögliche Größe einer Menge von stetigen Funktionen, die ausreichen, um jede mögliche stetige Funktion zu dominieren.

Eine Variante dieser Definition liefert die nächste Kardinalzahl \beth . Sie entspricht der kleinsten Größe einer Familie G mit der Eigenschaft, dass es keine stetige Funktion gibt, die alle Funktionen aus G dominiert. Man kann beweisen, dass $\aleph_1 \leq \beth \leq 2^{\aleph_0}$ gilt.



WIGGLESTICK / GETTY IMAGES / ISTOCK

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Neben den bereits erwähnten Ungleichungen sind weitere Beziehungen zwischen den vorgestellten insgesamt zwölf unendlichen Kardinalzahlen bekannt. Man fasst sie im so genannten Cichoń-Diagramm zusammen, das der britische Mathematiker David Fremlin 1984 eingeführt und nach seinem polnischen Kollegen Jacek Cichoń benannt hat (siehe »Cichoń-Diagramm«). Darin ersetzt man aus typografischen Gründen die Kleiner-gleich-Zeichen meist durch Pfeile.

Die zwölf Größen sind allerdings nicht völlig unabhängig voneinander. Wie sich herausstellt, ist $\text{add}(\mathcal{M})$ die kleinere der beiden Zahlen \aleph und $\text{cov}(\mathcal{M})$. Ebenso entspricht $\text{cof}(\mathcal{M})$ dem größeren der beiden Werte \aleph und $\text{non}(\mathcal{M})$. Diese zwei abhängigen Kardinalzahlen sind im Diagramm umrahmt. Es besteht also aus zwölf überabzählbaren Größen, von denen höchstens zehn verschieden sein können.

Wie verschieden können die Unendlichkeiten sein?

Wenn die Kontinuumshypothese allerdings gilt, ist \aleph_1 (die kleinste Zahl des Diagramms) gleich 2^{\aleph_0} (dem größten darin erscheinenden Wert), und damit ist jede Kenngröße gleich. Geht man hingegen davon aus, Cantors Vermutung sei falsch, könnten sie sich alle unterscheiden.

Über mehrere Jahrzehnte untersuchten Mathematiker, ob man für einige der Relationen des Diagramms statt nur der Kleiner-oder-gleich-Beziehung sogar Gleichheit beweisen kann. Dazu konstruierten sie zahlreiche unterschiedliche Universen, in denen sie zunächst die zwei kleinsten überabzählbaren Kardinalzahlen \aleph_1 und \aleph_2 auf verschiedene Weise dem Diagramm zuordneten. Zum Beispiel fanden sie ein Universum, in dem $\aleph_1 = \text{add}(\mathcal{N}) = \text{cov}(\mathcal{N})$ gilt und $\aleph_2 = \text{non}(\mathcal{M}) = \text{cof}(\mathcal{M})$.

Durch diese Arbeiten konnten die Forscher in den 1980er Jahren bestätigen: Zwischen allen Paaren von Kardinalzahlen des Diagramms kann man nur die darin angegebenen Beziehungen (mit den Mitteln von ZFC) beweisen. Genauer:

Für jede sinnvolle Beschriftung des Cichoń-Diagramms mit den Werten \aleph_1 und \aleph_2 gibt es ein Universum, in dem die entsprechenden Einträge realisiert werden.

Seit fast vier Jahrzehnten wusste man also, dass sämtliche Konstellationen von \aleph_1 und \aleph_2 im Diagramm möglich sind. Aber wie sieht es mit mehreren verschiedenen Werten zugleich aus? Könnten beispielsweise alle unabhängigen Einträge unterschiedlich sein? Einzelne Fälle mit drei Werten sind seit 50 Jahren bekannt, und in den 2010er Jahren fand man weitere Universen, in denen bis zu sieben verschiedene Kardinalzahlen im Cichoń-Diagramm auftraten.

Zusammen mit dem israelischen Mathematiker Saharon Shelah von der Hebrew University of Jerusalem konnten wir in einer 2019 erschienenen Arbeit ein Universum konstruieren, in dem tatsächlich die maximal mögliche Anzahl verschiedener unendlicher Werte (also zehn), im Cichoń-Diagramm vorkommen. Dabei verwendeten wir allerdings ein stärkeres Axiomensystem als ZFC, das die Existenz so genannter großer Kardinalzahlen voraussetzt – Unendlichkeiten, die mit den Mitteln von ZFC allein nicht beweisbar sind.

Das war zwar ein Fortschritt, doch wir waren damit nicht ganz zufrieden. Wir suchten zwei Jahre lang nach einer solchen Lösung, die lediglich mit den Axiomen von ZFC funktioniert. Zusammen mit unseren Kollegen Shelah und dem kolumbianischen Mathematiker Diego Mejía von der Shizuoka-Universität in Japan gelang es uns schließlich, das Ergebnis auch ohne diese zusätzlichen Annahmen zu beweisen.

Damit haben wir gezeigt: Die zehn Kenngrößen der reellen Zahlen können alle gleichzeitig verschieden sein. Das neue Resultat besagt jedoch nicht, dass es mindestens, höchstens oder genau zehn unendliche Kardinalzahlen zwischen \aleph_1 und dem Kontinuum geben kann. Das hat der US-amerikanische Mathematiker Robert Solovay schon 1963 bewiesen: Tatsächlich kann die Größe der reellen Zahlen stark variieren, es könnte 8, 27 oder unendlich viele Kardinalzahlen zwischen \aleph_1 und 2^{\aleph_0} geben – sogar überabzählbar viele. Wie unser Ergebnis belegt, gibt es mathematische Universen, in denen zehn bestimmte Kardinalzahlen, die zwischen \aleph_1 und 2^{\aleph_0} liegen, nicht gleich ausfallen.

Hiermit ist die Geschichte aber nicht zu Ende. Wie in der Mathematik üblich, bleiben viele Fragen offen, und es tauchen neue auf. Zum Beispiel gibt es neben den genannten Kardinalzahlen schon seit den 1940er Jahren zahlreiche weitere unendliche Größen, die zwischen \aleph_1 und dem Kontinuum liegen, deren genaue Beziehungen untereinander unbekannt sind. Wir hoffen, künftig herauszufinden, ob auch diese zusätzlich zu denen in Cichońs Diagramm verschieden sein können. ◀

QUELLEN

Goldstern, M. et al.: Cichoń's maximum. *Annals of Mathematics* 190, 2019

Goldstern, M. et al.: Cichoń's maximum without large cardinals. *ArXiv* 1906.06608, 2019



FRANZISCHÄDEL, FLORIAN FREISTETTER DE PRESSE // CC BY SA 4.0 CREATIVE COMMONS ORG.U/EN/US/BSBY/SA/4.0/LEGALCODE

FREISTETTERS FORMELWELT KI UND KURVENDISKUSSION

Jedes Jahr schicken Mathelehrer ihre Schüler von Neuem auf die Suche nach Extremwerten. Richtig spannend wird es aber, wenn künstliche Intelligenz den absoluten Höhepunkt sucht.

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

► spektrum.de/artikel/1823162

Generationen von Schülern haben im Mathematikunterricht unter der Kurvendiskussion gelitten. Das liegt nicht am Thema selbst, sondern weil Lehrer meist nicht erklären, was daran wirklich spannend ist. Nehmen wir diese Definition als Beispiel:

$$f(x_0) \geq f(x) \quad \forall x \in I \subset U$$

Die Formel beschreibt ein »lokales Maximum« einer Funktion f , die eine Teilmenge U der reellen Zahlen abbildet. Ein Punkt x_0 , der sich in einem Intervall $I = [a, b]$ befindet, ist ein lokales Maximum, wenn alle Funktionswerte in I kleiner oder gleich dem Wert von f bei x_0 sind.

Zeichnet man die Funktion auf, steigt die entsprechende Kurve, bis sie den Punkt x_0 erreicht, und sinkt dann wieder. Ein lokales Minimum definiert sich analog, nur umgekehrt. Globale Extremwerte hat die Funktion hingegen dort, wo sie über den gesamten Wertebereich gesehen am größten beziehungsweise kleinsten ist.

Solche Berechnungen sind das Kernstück jeder Kurvendiskussion. Aus mathematischer Sicht ist das keine große Kunst. Man muss dazu nur die Nullstellen der ersten Ableitung bestimmen. Denn diese gibt die Änderungsrate der Funktion an, und ein Maximum oder Minimum liegt genau an den Punkten, an denen keine Veränderung stattfindet. Das ist ein bisschen wie beim Bergsteigen: Solange es bergauf geht, verändert man seine Höhe über dem Meeresspiegel. Das hört erst auf, wenn man am Gipfel angekommen ist. Zudem ist nicht immer sofort ersichtlich, ob man den absoluten Höhepunkt erreicht hat oder ob es da hinten im Nebel vielleicht doch noch ein wenig nach oben weitergeht.

Ob es sich um ein lokales oder globales Maximum handelt, ist leicht zu bestimmen, wenn man die gesamte Kurve vor sich hat. In der Praxis kann es jedoch

deutlich schwieriger sein, das herauszufinden. Und genau da wird es spannend.

Eine Kurve aufzeichnen kann heute fast jeder Taschenrechner; die Berechnung der Extremwerte ist eine rein mechanische Anwendung grundlegender Rechenregeln. Aber was, wenn zum Beispiel nicht gelangweilte Jugendliche im Schulunterricht rechnen, sondern künstliche Intelligenz ein Problem lösen soll? Selbstlernende Algorithmen haben keine Ahnung, was sie tun oder warum; sie arbeiten nur auf ein bestimmtes Ziel hin.

Dieses definieren Informatiker häufig als Funktion, die es zu maximieren gilt, und der Algorithmus sucht nach Wegen, das Maximum zu finden. Stößt das Programm auf einen globalen Extremwert, ist alles in Ordnung. Liegt auf dem Weg allerdings ein lokales Maximum, müsste es sich nach diesem zuerst wieder verschlechtern, bevor es den optimalen Punkt finden kann. Das weiß der Algorithmus aber nicht – und wird bei der mittelmäßigen Lösung verharren, sofern man keine besonderen Vorkehrungen getroffen hat. Diese beschränken sich jedoch meist auf ein bestimmtes Problem und lassen sich nicht allgemein einsetzen. Künstliche Intelligenz finden wir inzwischen überall in unserem Alltag, und wie man zum Beispiel an »interessanten« Empfehlungen von Onlineshops sehen kann, funktionieren sie nicht immer optimal.

Kurvendiskussionen sind jedoch auch abseits davon relevant. Wenn Wissenschaftler beispielsweise im Kontext der Covid-19-Pandemie von einer ersten, zweiten oder dritten Welle sprechen, dann meinen sie die Extremwerte von Kurven.

Betrachten sie dabei den Verlauf der täglich neu Infizierten? Oder die gesamten Krankheitsfälle? Dort wo die eine Kurve sinkt, wird die andere trotzdem weiter steigen. Solche Zusammenhänge zu verstehen, ist das, was man aus Kurvendiskussionen lernen sollte. Das ist viel wichtiger, als sich nur auf das schematische Anwenden von Rechenregeln zu konzentrieren.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN DIE GEHEIMNISSE DER ZAHL 42

Wie eine vollkommen gewöhnliche Zahl die Aufmerksamkeit von Sciencefiction-Fans und Nerds erlangte – und weshalb sie auch Mathematiker fasziniert.



Jean-Paul Delahaye ist emeritierter Professor für Informatik an der Universität de Lille in Frankreich und arbeitet am Forschungszentrum für Informatik, Signal und Automatik in Lille (CRISTAL).

► spektrum.de/artikel/1823153

► 42. So lautet die Antwort auf die Frage nach dem Leben, dem Universum und dem ganzen Rest, schrieb Douglas Adams in seinem 1979 erschienenen Sciencefiction-Roman »Per Anhalter durch die Galaxis«. Das überraschende Ergebnis liefert der extrem leistungsstarke Computer Deep Thought, der dafür mehr als 7,5 Millionen Jahre gerechnet hat.

Enttäuscht stellen die Figuren der Geschichte fest, dass sie ihre Frage hätten präziser formulieren sollen, um ein nützlicheres Resultat zu erhalten. Doch, so beruhigt sie der Computer, er könne die konkrete Frage ausarbeiten, deren Antwort 42 lautet. Dafür müsse er allerdings eine neue Version von sich selbst erschaffen, was ebenfalls viel Zeit in Anspruch nehmen würde.

Wer herausfinden möchte, wie es weitergeht, sollte Adams' Bücher lesen. Über die 42 kann man aber auch ohne die Lektüre spekulieren. Die Zahl ist mittlerweile ein zentrales Element der Nerd-Kultur. Sucht man beispielsweise im Internet nach »Antwort auf alles« oder etwas Ähnlichem, liefern Suchmaschinen als Ergebnis »42«. Die Zahl kommt zudem in etlichen Serien und Hollywoodfilmen vor, wie in »Spider-Man: A New Universe«.

In der Geschichte der Menschheit taucht die 42 an vielen weiteren Stellen auf. Die alten Ägypter glaubten etwa, ein Verstorbener müsste beim Totengericht vor 42 Richtern erklären, während seines Lebens keine von 42 Sünden begangen zu haben. Tibet hatte 42 Könige: Nyatri Tsenpo, der um 127 v. Chr.

regierte, war der Erste, und Langdarma, der von 836 bis 842 herrschte, der Letzte. Die Gutenberg-Bibel hat 42 Textzeilen pro Spalte und trägt deshalb den vollständigen Titel »42-zeilige Bibel«. Am 15. Juli 2020 beschloss die EU-Kommission, Deutschland solle jährlich 42 Prozent mehr in den EU-Haushalt einzahlen als bisher.

In binärer Darstellung nimmt 42 die prägnante Form 101010 ($= 2^5 + 2^3 + 2^1$) an. Daher nahmen einige Fans den 10. Oktober 2010 zum Anlass, eine Party zu feiern. Manche Personen vermuten, die Wahl von 42 hänge mit der Basis 13 zusammen. Denn Adams erwähnt mehrmals in seinem Roman, 42 sei die Antwort auf die Frage »wie viel ergibt 6 mal 9?«. Das macht zwar keinen Sinn, weil $6 \cdot 9 = 54$. Zur Basis 13 entspricht die 42 aber der 54 in Dezimalschreibweise, nämlich: $4 \cdot 13 + 2 \cdot 1 = 54$.

Natürlich wurde Adams schon häufig gefragt, ob die 42 eine besondere Bedeutung für ihn habe. Seine Antwort ist ernüchternd: »Es war ein Witz. Es musste eine gewöhnliche, kleine Zahl sein, und ich habe mich für diese entschieden. Binäre Darstellungen, die Basis 13, tibetische

FASZINIERENDE ZAHL Durch das Buch »Per Anhalter durch die Galaxis« ist die 42 berühmt geworden. Aber ist sie wirklich besonders?

Mönche – das ist einfach Unsinn. Ich setzte mich an meinen Schreibtisch, schaute in den Garten und dachte »42 könnte funktionieren« und schrieb es auf.«

Doch auch abgesehen von den Fällen, bei denen die 42 durch Scherze von Informatikern oder rein zufällig auftritt, kann man sich fragen, ob die Zahl aus mathematischer Sicht interessant ist. Tatsächlich hat die 42 einige spannende Eigenschaften. Hier ist eine Auswahl:

42 ist die Summe der ersten drei Zweierpotenzen mit ungeradem Exponenten: $2^1 + 2^3 + 2^5 = 42$. Damit ist sie ein Element der Folge $a(n)$, der Summe ungerader Potenzen von zwei. In der »Encyclopedia of Numerical Sequences« des britisch-US-amerikanischen Mathematikers Neil Sloane, das die wichtigsten Folgen enthält, taucht $a(n)$ ebenfalls auf. In binärer Schreibweise ist das n -te Glied der Folge 1010...10, wobei die »10« n -mal erscheint. Die Formel für das n -te Element lautet in Dezimalschreibweise $a(n) = \frac{2}{3}(4n - 1)$. Für große n nehmen die Abstände zwischen den Folgengliedern $a(n)$ immer weiter zu, weshalb Zahlen, die zu dieser Folge gehören, selten sind. Das macht 42 außergewöhnlich.

Zudem ist 42 die Summe der ersten beiden Potenzen von sechs ($6^1 + 6^2 = 42$). Sie wird durch die rekursiven Formeln $b(0) = 0$ und $b(n) = 6 \cdot b(n - 1) + 6$ definiert. Die Dichte der Glieder $b(n)$ tendiert bei großen n ebenfalls gegen null.

42 ist darüber hinaus eine der extrem seltenen Catalan-Zahlen: Bloß 14 von ihnen sind kleiner als eine Million. Leonhard Euler erwähnte diese Zahlen erstmals, als er untersuchte, wie man ein n -seitiges konvexes Vieleck in Dreiecke zerlegen kann. Die ersten Catalan-Zahlen lauten 1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, ... Die Formel $c(n) = \frac{(2n)!}{n! \cdot (n+1)!}$ gibt den n -ten Term an. Wie bei den beiden vorhergehenden Beispielen verschwindet die Dichte von $c(n)$ für große n .

Und die 42 ist eine »praktische« Zahl, das heißt, jede kleinere Zahl lässt sich als Summe einiger ihrer Teiler schreiben. Die ersten praktischen Zahlen sind 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 18, 20, 24, 28, 30, 32, 36, 40, 42, 48, 54, 56, 60, 64, 66, 72, ... Bisher kennt man keine einfache Formel, um den n -ten Term der Folge zu berechnen – die Dichte der Glieder scheint aber in diesem Fall für große n nicht gegen null zu gehen.

All das ist zwar unterhaltsam, doch das macht die 42 mathematisch gesehen nicht außergewöhnlich. 41 oder 43 tauchen beispielsweise auch in vielen Folgen auf. Deshalb haben sich die Forscher Nicolas Gauvrit, Hector Zénil und ich die Frage gestellt, welche natürlichen Zahlen besonders interessant sind – und welche völlig langweilig.

Um das zu untersuchen, haben wir die Folgen in Sloanes Enzyklopädie genauer unter die Lupe genommen. Neben einem theoretischen Zusammenhang zu der von dem sowjetischen Wahrscheinlichkeitstheoretiker Kolmogorov definierten Komplexität (interessant sind Zahlenfolgen, die sich knapp und präzise beschreiben lassen) erkannten wir Anzeichen persönlicher Vorlieben in der Auswahl. Weil Primzahlen oder fibonacciartige Folgen die Menschen seit jeher faszinieren, gibt es dazu vermehrt Einträge, so dass die Enzyklopädie nicht nur auf mathematischer Objektivität basiert.

Bisher sind Wissenschaftler davon ausgegangen, man hätte die genannten Spielchen ebenso mit einer anderen Zahl als 42 treiben können. Allerdings machte kürzlich eine amüsante Nachricht die Runde: Beim Problem der Summe dreier Kubikzahlen bereitete die 42 mehr Mühe als ihre übrigen zweistelligen Genossen. Das Problem lautet wie folgt: Welche ganzen Zahlen n lassen sich als Summe dreier ganzzahliger Kubikzahlen schreiben: $n = a^3 + b^3 + c^3$?

Weil Kubikzahlen für ein gegebenes n auch negativ ausfallen können, sind die Zahlenwerte von a , b und c unbegrenzt. Damit ist die Aufgabe wesentlich komplizierter, als sie klingt. Anders ist es bei der Summe von Quadratzahlen: Diese sind durch den Wert von n eingeschränkt. Bei Kubikzahlen gibt es dagegen riesige, unerwartete Lösungen, etwa für 156:

$$156 = 26\,577\,110\,807\,569^3 + (-18\,161\,093\,358\,005)^3 + (-23\,381\,515\,025\,762)^3$$

Für manche Werte von n gibt es nicht einmal eine Möglichkeit, sie derart zu zerlegen. Das ist zum Beispiel für alle n der Form $9m + 4$ und $9m + 5$ (wie

4, 5, 13, 14, 22, 23) der Fall. Um das zu beweisen, muss man zunächst einen anderen Zahlenraum nutzen als den der ganzen Zahlen: Man wechselt zur Uhrzeit-Arithmetik, indem man $9 = 0$ setzt und nur mit Ziffern zwischen 0 und 8 arbeitet.

Das Prinzip ist ganz ähnlich zu einer Uhr, die im Zahlenraum von 1 bis 12 operiert: Möchte man um elf Uhr wissen, auf welche Zahl der Zeiger in drei Stunden zeigt, rechnet man $11 + 3 = 14$, zieht 12 ab, was 2 ergibt. Im Zahlenraum von 0 bis 9 teilt man analog alle größeren Zahlen durch 9 und erhält den Rest als Ergebnis. In diesem Raum, den man durch »mod 9« beziehungsweise »modulo 9« kennzeichnet, gibt es folgende Kubikzahlen:

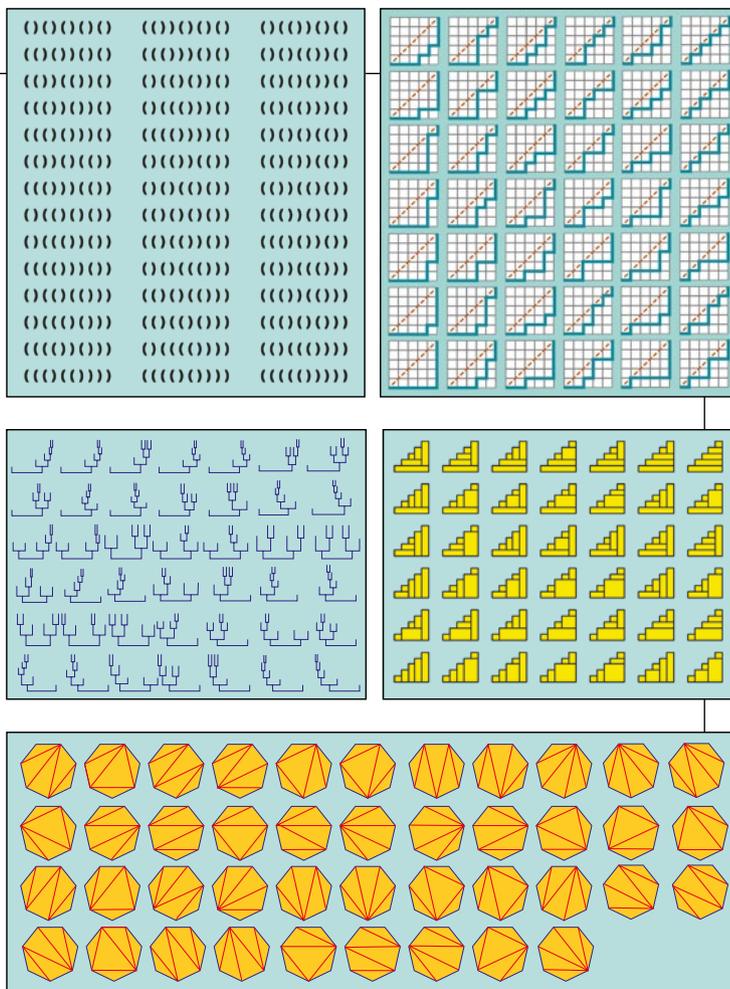
$$\begin{aligned} 0^3 &= 0 \pmod{9} \\ 1^3 &= 1 \pmod{9} \\ 2^3 &= 8 \pmod{9} \\ 3^3 &= 27 = 0 \pmod{9} \end{aligned}$$

Catalan-Zahlen

Die Folgenglieder von $c(n)$ sind nach dem französisch-belgischen Mathematiker Eugène Charles Catalan (1814–1894) benannt, der entdeckte, dass $c(n)$ die Anzahl der Möglichkeiten ist, n Klammernpaare nach den üblichen Schreibregeln anzuordnen: eine Klammer nie schließen, bevor man sie geöffnet hat; zudem darf man eine Klammer erst dann schließen, wenn alle darin enthaltenen bereits zu sind. Zum Beispiel gibt es $c(3) = 5$ mögliche Anordnungen von 3 Klammernpaaren: $((()))$; $(())()$; $(())()$; $(())()$; $(())()$.

Solche Zahlen sind extrem selten: Nur 14 von ihnen sind kleiner als eine Million. Ihre Folge beginnt mit: 1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, 429, 1430, 4862, 16 796, 58 786, 208 012, 742 900, 2 674 440, 9 694 845, 35 357 670, 129 644 790, 477 638 700, 1 767 263 190, 6 564 120 420, 24 466 267 020, 91 482 563 640, 343 059 613 650, 1 289 904 147 324, 4 861 946 401 452, 18 367 353 072 152, 69 533 550 916 004, 263 747 951 750 360, ...

42 entspricht der Catalan-Zahl $c(5)$. Es gibt also 42 Möglichkeiten, fünf Klammernpaare richtig anzuordnen. $c(5)$ hat aber auch weitere Bedeutungen. Hat man ein Gitter aus fünf mal fünf Feldern und zieht eine Diagonale hindurch, dann gibt es 42 verschiedene Wege, die von der unteren linken in die obere rechte Ecke führen, ohne die Diagonale zu schneiden oder einen Schritt nach unten zu machen. Zudem beträgt die Anzahl der sechsblättrigen binären Bäume 42, genauso wie die Anzahl der Möglichkeiten, die Seite einer fünfstufigen Treppe mit Rechtecken zu überdecken. Darüber hinaus kann man ein regelmäßiges Siebeneck auf 42 unterschiedliche Arten in Dreiecke zerlegen.



POUR LA SCIENCE DELAMAYE, J.-P., LES SECRETS DU NOMBRE 42, POUR LA SCIENCE, FÉVRIER 2020

$$4^3 = 64 = 1 \pmod{9}$$

$$5^3 = 125 = 8 \pmod{9}$$

$$6^3 = 216 = 0 \pmod{9}$$

$$7^3 = 343 = 1 \pmod{9}$$

$$8^3 = 512 = 8 \pmod{9}$$

Das heißt, Kubikzahlen modulo 9 sind entweder 0, 1 oder 8. Addiert man drei von ihnen im eingeschränkten Zahlenraum auf, erhält man:

$$0 = 0 + 0 + 0 = 0 + 1 + 8$$

$$1 = 1 + 0 + 0 = 1 + 1 + 8$$

$$2 = 1 + 1 + 0$$

$$3 = 1 + 1 + 1$$

$$6 = 8 + 8 + 8$$

$$7 = 8 + 8 + 0$$

$$8 = 8 + 0 + 0 = 1 + 8 + 8$$

Das heißt, man kann mit den drei Kubikzahlen keine 4 oder 5 erhalten. Daher kann die Zahl n niemals die Form $9m + 4$ oder $9m + 5$ annehmen, weshalb man sie als »verbotene Werte« bezeichnet.

Die Suche nach Lösungen der Gleichung $n = a^3 + b^3 + c^3$ ist extrem kompliziert. Das zeigen schon die einfachsten Fälle: Für $n = 1$ gibt es die offensichtliche Lösung $1^3 + 1^3 + (-1)^3 = 1$. Doch es existieren auch andere: $9^3 + (-6)^3 + (-8)^3 = 729 + (-216) + (-512) = 1$. Und es geht noch weiter. 1936 identifizierte der deutsche Zahlentheoretiker Kurt Mahler unendlich viele Varianten der Form: $(9p^4)^3 + (3p - 9p^4)^3 + (1 - 9p^3)^3 = 1$, wobei p eine beliebige ganze Zahl ist.

Auch $n = 2$ hat unendlich viele Lösungen. Der Mathematiker A. S. Werebrusow entdeckte sie bereits 1908: $(6p^3 + 1)^3 + (1 - 6p^3)^3 + (-6p^2)^3 = 2$. Indem man die Terme beider Gleichungen mit einer Kubikzahl r^3 multipliziert, erhält man für jede Kubikzahl r^3 und jede doppelte Kubikzahl $2r^3$ unendlich viele Lösungen. Für 16 ergibt sich mit $p = 1$ zum Beispiel: $14^3 + (-10)^3 + (-12)^3 = 16$

Bis August 2019 kannte man für $n = 3$ dagegen nur zwei Lösungen: $1^3 + 1^3 + 1^3 = 3$ und $4^3 + 4^3 + (-5)^3 = 3$. Unter enormen Aufwand fand man schließlich eine dritte Möglichkeit: $3 = (-472\,715\,493\,453\,327\,032)^3 + (-569\,936\,821\,113\,563\,493\,509)^3 + 569\,936\,821\,221\,962\,380\,720^3$

Aber wie sieht es mit anderen Werten von n aus, die nicht zu den verbotenen Zahlen gehören? Haben sie immer eine Lösung? Um das zu beantworten, kann man die möglichen Zahlen einzeln untersuchen: 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, ... (auch diese Folge ist in Sloanes Enzyklopädie vermerkt). Gelingt das Vorhaben in allen Fällen, hätte man einen Hinweis, dass sich jede natürliche Zahl n , die nicht die Form $n = 9m + 4$ oder $n = 9m + 5$ hat, in die Summe dreier Kubikzahlen zerlegen lässt.

Tatsächlich haben Wissenschaftler inzwischen mit Hilfe leistungsfähiger Computernetzwerke beeindruckende Ergebnisse erzielt. Doch einige Rätsel blieben ungelöst – und das führt uns zurück zur 42.

2009 untersuchten die Mathematiker Andreas-Stephan Eisenhans und Jörg Jahnel alle Tripel a, b, c mit Beträgen kleiner als 10^{14} , um Lösungen für n zwischen 1 und 1000 zu finden.

Nur bei 14 Zahlen scheiterten sie: 33, 42, 74, 114, 165, 390, 579, 627, 633, 732, 795, 906, 921 und 975. Für n

kleiner als 100 blieben sogar bloß drei Werte offen: 33, 42 und 74.

Sieben Jahre später identifizierte Sander Huismen eine Lösung für $74 = (-284\,650\,292\,555\,885)^3 + 66\,229\,832\,190\,556^3 + 283\,450\,105\,697\,727^3$. Und im März 2019 hakte Andrew Booker den Fall 33 ab: $8\,866\,128\,975\,287\,528^3 + (-877\,8405\,442\,862\,239)^3 + (-2\,736\,111\,468\,807\,040)^3$.

Plötzlich war 42 die letzte zweistellige Zahl, von der man nicht wusste, ob sie sich als Summe von drei Kubikzahlen schreiben lässt. Sollte das nicht gelingen, müsste es einen triftigen mathematischen Grund dafür geben – damit wäre die 42 doch noch etwas Besonderes. Die Computer liefen auf Hochtouren, aber das Problem schien sie zu überfordern.

Im September 2019 kam schließlich die Antwort – gerade einmal sechs Monate nach der Lösung für die 33. Es war das Ergebnis einer gewaltigen Berechnung, die Andrew Booker und Andrew Sutherland koordinierten. Die beeindruckende Leistung erbrachten mehrere private Computer, die Teil des Netzwerks »Charity Engine« waren, das seine Kapazität Universitäten und anderen Projekten zur Verfügung stellt. Nach zusammengerechnet mehr als einer Million Stunden Rechendauer fanden sie folgendes Resultat: $42 = (-80\,538\,738\,812\,075\,974)^3 + 80\,435\,758\,145\,817\,515^3 + 12\,602\,123\,297\,335\,631^3$

Auch die Fälle für $n = 165, 795$ und 906 wurden kürzlich gelöst. Damit bleiben nur noch 114, 390, 579, 627, 633, 732, 921 und 975 als dreistellige Zahlen offen. Der Verdacht, es gäbe für alle erlaubten Werte n Lösungen, erhärtet sich immer mehr. 1992 schlug Roger Heath-Brown sogar vor, dass für alle nicht verbotenen n unendlich viele Möglichkeiten existieren, sie als Summe dreier Kubikzahlen zu schreiben. Die Arbeit ist also lange nicht abgeschlossen.

Weil das Problem so schwierig ist, gehen einige Mathematiker davon aus, es könne unentscheidbar sein. Dann wäre kein noch so cleverer Algorithmus in der Lage, alle möglichen Fälle von n zu bewältigen. Ein typisches Beispiel für ein unentscheidbares Problem ist das so genannte Halteproblem, das Alan Turing 1936 vorstellte: Es gibt keinen Algorithmus, der für jedes beliebige Programm entscheiden kann, ob es bei seiner Berechnung irgendwann zum Schluss kommt oder für immer weiterläuft. Im Gegensatz zum Halteproblem ist die Frage nach der Summe von Kubikzahlen jedoch wesentlich weniger abstrakt und handelt von handfesten Eigenschaften natürlicher Zahlen. Würde man dafür eine solche Unentscheidbarkeit nachweisen, wäre das etwas völlig Neues. ◀

QUELLEN

Booker, A. R.: Cracking the problem with 33. Research in Number Theory volume 5, 2019

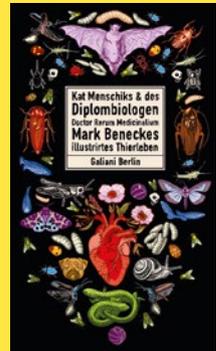
Eisenhans, A.-S., Jahnel, J.: New sums of three cubes. Mathematics of Computation 78, 2009

Gauvrit, N. et al.: Sloane's gap. Mathematical and social factors explain the distribution of numbers in the OEIS. Journal of Humanistic Mathematics 3, 2013

REZENSIONEN



Kat Menschik,
Mark Benecke
**KAT MENSCHIKS
& DES DIPLOM-
BIOLOGEN
DOCTOR RERUM
MEDICINA-
LIUM MARK
BENECKES
ILLUSTRIRTES
THIERLEBEN**
Galiani Berlin
2020
160 S., € 20



DACKELBLICK
Offenbar nutzen
Hunde den
schuldbewussten
Blick gezielt, um
ihre Herrchen zu
manipulieren.

ZOOLOGIE PRACHTBAND MIT EKELMOMENTEN

Schöner und liebevoller als von Kat Menschik und Mark Benecke können weder unsere viel geliebten Begleiter noch Ungeziefer porträtiert werden.

► Es ist ein gewichtiger Titel für einen schmalen Band: Unter »Kat Menschiks & des Diplombiologen Doctor Rerum Medicinalium Mark Beneckes illustriertes Thierleben« präsentieren die preisgekrönte Illustratorin und der prominente Kriminalbiologe ihre eigene Sicht auf die Tierwelt. Verzeihung, auf die »Thierwelt«: Die Anlehnung an historische Werke bremscher Art ist gewitzt – und passt. Denn auch die in dem Buch getroffene Auswahl an Comicfiguren bis zu realen Tieren ist höchst subjektiv, dafür aber umso vergnüglicher.

Die 17 völlig unterschiedlichen Porträts fügen sich zusammen, weil es im Grunde doch nur um eine Spezies geht: den Menschen mit all seinen Marotten und Empfindlichkeiten. Vielleicht zeigen sich unsere Untiefen tatsächlich nirgends deutlicher als im Umgang mit anderen Tieren, vor allem wenn sie uns für eine nüchterne Betrachtung zu nahe stehen oder wir sie wegen ihrer unerquicklichen Lebensweise in eine Schmutzdecke verfrachten.

Die engste Beziehung pflegen wir zum Hund, der im Buch in der »beschämten« Variante auftritt. Gemeint ist der scheinbar schuld bewusste Blick, den keiner besser beherrscht als der beste Freund des Menschen. Haben die Tiere etwas ausgefressen, lässt sich ihr schlechtes Gewissen angeblich sofort am treuherzigen Augenaufschlag ablesen. Hunde hätten aber gar keinen moralischen Kompass, kontert Benecke. Dafür können sie ihre Herrchen gut genug lesen, um sie bei Bedarf mit dem passenden Ausdruck in eine mildere Stimmung zu versetzen.

Verkannt werden auch Pudeln, die laut Benecke »ursprünglich weder Schoß- noch Familientiere waren,

sondern Jagdhunde«. Kaum bekannt dürfte sein, dass man die Tiere scheeren muss, damit sie ihr dichtes Fell nicht vollständig umhüllt. Der Schnitt ist also nötig, aber welche Frisur soll es sein? Den Pudeln schert diese Frage wahrscheinlich wenig, den Menschen dafür umso mehr – mit manchmal lebensbedrohlichen Konsequenzen.

Ein Beispiel liefert Benecke mit Hans Thum, der Mitte der 1930er Jahre den so genannten »Karakul-Schnitt« (den bekannten Pudeln-Schnitt mit einem buschigen Schwanz, Beinen und Ohren) entwickelte, den viele Züchter und Halter als unschön empfanden. Die nationalsozialistische Fachschaft für Pudeln verbot ihn als »undeutsch«. Entsprechend geschorene Tiere galten als Bastarde und bekamen Zuchtverbot und somit gegen Kriegsende auch keine Futtermittelkarten mehr zugeteilt. Doch damit nicht genug: Es gab sogar einen Antrag, Hans Thum in ein Konzentrationslager zu bringen.

So eng uns manche Tiere sind, so weit weg wünschen wir uns andere. Das an sich unschädliche Silberfischchen gehört dazu, weil es gern in unseren Bädern lebt. Dabei zeigen sich die Bewohner meist nur nachts und verstecken sich sofort in der nächsten Ritze, sobald das Licht angeht. Das ist schade, da so keine Zeit für einen genaueren Blick auf das Silberfischchen und seinen schimmernden Schuppenpanzer bleibt: »Perfekt wie Perlen!«, beschreibt Benecke das Tierchen.

Fast noch schöner sind Rotbeinige Schinkenkäfer: »Sie hatten tiefrote, ins Bräunliche spielende Beine, die sich vom Glitzerblau nebst hauchzartem Grünlich ihrer Körperpanzerung abhoben.« Am Aussehen liegt es also nicht, dass selbst Biologen oft mit Zurückhaltung auf die prachtvollen Tiere reagieren. Es ist ihrer Vorliebe für Trockenobst, Käse und – der Name verrät es – Schinken. Besonders problematisch ist, dass der Mensch aus Sicht der Käfer hier keine Ausnahme macht, wodurch sie Benecke berufsbedingt in Leichen findet.

Wobei sich auch »Haustiere, die Menschen essen«, in der Not mit solcher Nahrung versorgen, wie im

gleichnamigen Kapitel zu erfahren ist. Zimmerliche Leser brauchen bei der Lektüre also starke Nerven, vor allem wenn Benecke aus dem Nähkästchen plaudert. Dafür gibt es einiges zu lernen, während man gleichzeitig eigene Vorurteile abbauen kann. Mehr vermag ein Buch kaum zu leisten, dessen prachtvolle Ausstattung die gelegentlichen Ekelmomente wettmacht.

Das ist Menschiks Verdienst, deren überwiegend knallbunte Illustrationen – vom Oktopus zur Schnirkelschnecke, von der Fledermaus zur Kakerlake, von Mark Benecke bis zu seinen viel geliebten Maden – die Vielfalt der Tierwelt einfangen. Sie heben sich vor dem schwarzen Hintergrund besonders gut ab, auf Cover und Rücken sogar spürbar im Relief. Selbst vor Risiken und Nebenwirkungen der Lektüre wird gewarnt: Auf dem Buchrücken prangt eine Fleischfliege mit Totenschädel.

Die Biologin Susanne Wedlich arbeitet als Wissenschaftsautorin in Münster.

ZIVILISATIONSGESCHICHTE VON DER MENSCHWERDUNG BIS ZUR ENTWICKLUNG DES COMPUTERS

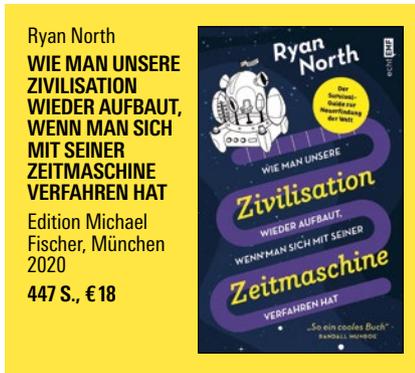
Das Buch liefert eine kompakte Anleitung, um die Technik und Kultur der vergangenen 200 000 Jahre schnell neu zu errichten, sollte diese einmal verloren gehen.

► Spätestens seit dem Film »Zurück in die Zukunft« weiß man: Zeitmäschinen sind notorisch unzuverlässig. Meist geht irgendetwas schief, und man hängt ungewollt in der Vergangenheit fest. Doch während es Marty McFly in besagter Geschichte vergleichsweise gut traf – er reiste nur wenige Jahrzehnte zurück –, könnte es einen auch übler erwischen. Plötzlich findet man sich ohne Ausweg irgendwo im Neolithikum wieder und spätestens dann ist Not am Mann.

Fürchten braucht man sich vor diesem Fall nun nicht mehr, denn

REZENSIONEN

genau hierfür hat der kanadische Autor und Programmierer Ryan North einen humorvollen Ratgeber geschrieben. Mit dem Buch sollte es dem Gestrandeten möglich sein, an jedem Zeitpunkt der letzten 200 000 Jahre anzuknüpfen, um unsere Zivilisation wieder aufzubauen und es sich in der Vergangenheit relativ bequem einzurichten.



Mit Hilfe dieses fiktiven Szenarios gelingt es Ryan North, dem Leser die Errungenschaften der Menschheit ausgesprochen lebhaft vor Augen zu führen und deren großen Nutzen deutlich zu machen. Das Buch findet sich im Stil irgendwo zwischen »Per Anhalter durch die Galaxis«, einem Survival-Ratgeber à la Rüdiger Nehberg und einem Lexikon wieder. North selbst hat das Werk als Leitfaden und Reparaturanleitung geschrieben: inklusive FAQs für Nutzer von Zeitmaschinen, einem Haftungsausschluss für die (sonst eigentlich recht zuverlässigen) Maschinen sowie hilfreichen Entscheidungsbäumen, um beispielsweise zu bestimmen, in welcher Zeit man gestrandet ist oder welche Technologien man in welcher Reihenfolge erfinden müsste, damit man einen gewünschten zivilisatorischen Zustand erreicht.

Man kann das Buch wie ein Lexikon an jeder Stelle aufschlagen und direkt Interessantes lernen. Es lohnt sich aber, vorne anzufangen, um keinen Entwicklungsschritt der Menschheit zu verpassen. So erarbeitet sich der Leser eine solide technologische Basis, auf der er später aufbauen kann. Sinnvollerweise sollte man etwa als Allererstes die gesprochene und

geschriebene Sprache erfinden, ein praktikables Zahlensystem etablieren, eine wissenschaftliche Methode finden und seine Ernährung sichern.

Damit gerüstet kann der Zeitreisende dann voranschreiten und die Zivilisation gezielt wieder entwickeln: von der Domestizierung der wichtigsten Tiere und der Züchtung nützlicher Pflanzen über die Metallverarbeitung, von der Entwicklung der Dampfmaschine und des Fahrrads bis zur Herstellung von Antibiotika und zu den Grundzügen der Musiktheorie. Der Autor lässt keinen Bereich aus, der unser heutiges Leben bestimmt, und vermittelt dies so spielerisch und lustig, dass man das Buch kaum aus der Hand legen möchte – zumal der Stil eines Handbuchs mit direkter Ansprache des Lesers hervorragend funktioniert. So benennt North Kapitel nicht etwa als »Die Entwicklung der Navigation und von Fortbewegungsmitteln«, sondern: »Häufige Beschwerden, die mit Technologie gelöst werden können: »Hier ist es doof, und ich will woanders hin«.

Es folgen praktische Anleitungen zur Herstellung des Fahrrads oder des Kompasses, zur Bestimmung von Längen- und Breitengraden sowie Informationen zur See- und Luftfahrt. Am Ende weiß der Leser, wie man chemisch Wasserstoff herstellt (um Zeppeline zum Fliegen zu bringen) und wie Flugzeuge funktionieren. Hilfreich sind auch die in den Text eingestreuten »Zivilisations-Profitipps«, um Fehler zu vermeiden, die früheren Generationen unterlaufen sind. Beispiel: »Sich mit Federn zu bekleben, ist zum Fliegen weder nötig noch ausreichend, sondern eine Entscheidung, die nur aus Modegründen getroffen werden sollte.« Das erspart ohne Zweifel Zeit und tragische Pannen. Nützlich dürfte auch der Tipp sein: »Es ergeben sich

Man kann das Buch einfach aufschlagen und Interessantes lernen

Nachteile daraus, die Grundlagen moderner Wissenschaft und Messung auf einem alten Haufen Metall in einem Glas in Frankreich aufzubauen« – gemeint ist das Urkilo in Frankreich, das im Lauf der Zeit Gewicht verliert, wodurch es sich anbietet, gleich auf eine Naturkonstante zur Gewichtsdefinition zu setzen, wenn man schon mal dabei ist, die Zivilisation neu zu errichten.

Das Buch wird durch einige Anhängende vervollständigt, die sich für Zeitreisende und interessierte Zeitgenossen als hilfreich erweisen könnten – vom Periodensystem über wichtige chemische Substanzen (sowie die Anleitung zu deren Synthese) und Trigonometrietabellen bis hin zur Darstellung der Lage der menschlichen Organe im Körper. Man kann sich dem Klappentext nur anschließen: »So ein cooles Buch«.

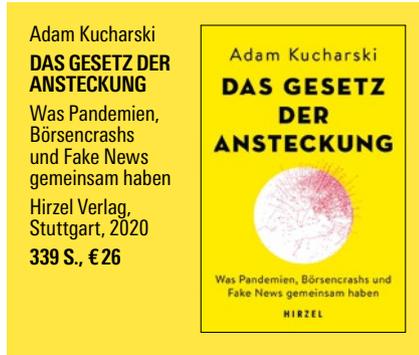
Tim Haarmann ist Geograf und arbeitet in Bonn.

EPIDEMIOLOGIE VON DER REALITÄT ÜBERRANNT

Der Epidemiologe Adam Kucharski erläutert, wie sich sein Fachgebiet in verschiedensten Situationen anwenden lässt. Er beschreibt dadurch nicht nur Krankheiten, sondern auch Börsencrashes oder virale Internetinhalte.

► Die globale Corona-Pandemie führt unserer Generation gnadenlos vor, wie sich ein neuartiges Virus ausbreitet. Trotz großer Anstrengungen und vieler Einschränkungen gelingt es keinem Land, die damit einhergehende Lungenkrankheit zu stoppen. Scheinbar unaufhaltsam stecken sich immer mehr Menschen an, ein gewisser Teil erkrankt, manchmal mit tödlichen Folgen.

Die tägliche Berichterstattung hat uns neue Begriffe gelehrt, wie Reproduktionszahl, Herdenimmunität oder Inzidenzwert. Dabei handelt es sich um Fachausdrücke der Epidemiologie, die Lehre der Verbreitung von Epidemien. Die Disziplin ist natürlich viel älter als Covid-19, aber 2020 rückte sie erstmals ins Zentrum des öffentlichen Diskurses.



Höchste Zeit, sich über diese Wissenschaft zu informieren.

Adam Kucharski ist britischer Epidemiologe und Professor an der London School of Hygiene and Tropical Medicine. Mit »Das Gesetz der Ansteckung« führt er in sein brisant aktuell gewordenen Fachgebiet ein. Begründet hat es Ronald Ross (1857–1932), der 1902 den zweiten Medizin-Nobelpreis für die Aufklärung des Verbreitungswegs von Malaria erhielt. Nach einer kurzen historischen Einfüh-

rung erläutert Kucharski die damit verbundene Mathematik – mittels einfacher Diagramme und ohne Formeln. Vordergründiges Ziel ist zunächst, zu beschreiben, wie eine Epidemie verläuft.

Denn aus Fallzahlen kann man einiges lernen: Führte eine äußere Einwirkung zu einer breiten Ansteckung, oder wird die Krankheit von Person zu Person weitergegeben? Wie viele Menschen steckt ein Infizierter durchschnittlich an, und wie stark schwankt die Zahl? Wie schnell breitet sich ein Virus aus? Wenn man eine Epidemie auf solche Weise besser versteht, kann man zum nächsten Schritt übergehen: sich gezielte Maßnahmen überlegen, um eine weitere Verbreitung zu unterbrechen. Dies ist das ultimative Versprechen der Epidemiologie – und wie man an der aktuellen Coronakrise sieht, offensichtlich nicht immer erfolgreich, sei es, weil das Wissen um die Ausbreitung ungenügend ist,

oder sich geeignete Maßnahmen nicht umsetzen lassen.

Der Autor legt den Schwerpunkt seines Buchs jedoch nicht auf Epidemien. Wie der Untertitel verrät, möchte er vor allem zeigen, dass die damit verbundenen mathematischen Gesetze für viele Systeme gelten: die Ausbreitung von Gewalt, Panik an der Börse oder virale Tweets, die sich heutzutage innerhalb weniger Stunden um die ganze Welt verbreiten.

Dazu führt er zahlreiche Fallstudien an. Weil man als Leser die zu Grunde liegende These schnell verstanden hat, macht die Menge an Beispielen und die Ausführlichkeit, mit der Kucharski diese diskutiert, das Buch leider etwas langatmig. Oftmals verdecken die Details der jeweiligen Studien den größeren Zusammenhang.

Dennoch sind die vorgestellten Analogien frappierend. Die gemeinsame Sprache erlaubt es sogar, die Ansteckungsgefahr der Masern etwa

Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile als Abonnent

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

- ▶ Verlosungen von Büchern und **Spektrum Kompakts**
- ▶ Eigene Veranstaltungen und ausgewählte Veranstaltungen von Partnern zum Vorteilspreis
 - 12. 6. 2021: **Spektrum-LIVE**-Veranstaltung – Flug im Space- oder Flugsimulator & Vortrag »Risk Management im Cockpit«, Zürich
 - 23. 3. 2021: Virtueller Vortrag über die Geologie Islands
- ▶ Rabatt für den Onlinekurs: **Spektrum** Schreibwerkstatt
- ▶ Preisnachlass auf diverse Leserreisen
- ▶ Kostenlose und ermäßigte digitale Produkte und weitere Vorteile:
 - kostenfreier Download des Monats im Februar: **Spektrum KOMPAKT** »Frühes Universum«
 - reduzierte Digitalpakete »Kernfusion«, »Medikamente« und »**Spektrum** GESCHICHTE Jahrgang 2020«
 - Englischkurs von Gymglish zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Weitere Informationen und Anmeldung:
[Spektrum.de/plus](https://www.spektrum.de/plus)

mit der Verbreitung von Nachrichten im Internet zu vergleichen. So wird deutlich, dass die Prozesse und Begriffe, die covidbedingt zurzeit Schlagzeilen machen, keineswegs nur wegen der globalen Pandemie relevant sind. Vermutlich ist die Frage, wie sich Information im Internet verbreitet, auf lange Sicht gesellschaftlich bedeutender und führt – im Gegensatz zur Coronakrise – zu nicht nur temporären Verhaltensänderungen.

Rundum ein aktuelles und wichtiges Buch? Leider nicht ganz. Das Thema, warum ein Leser sich dieses Werk wohl kauft, wird nämlich nur am Rande erwähnt: Corona. An vielen Stellen wünscht man sich, der Autor würde die gegenwärtige Pandemie mitdiskutieren. Weshalb er das nicht tut, ist einfach zu verstehen: Die englische Originalausgabe erschien bereits am 13. Februar 2020, also rund einen Monat, bevor die globale Dimension der Epidemie spürbar wurde. Dadurch wirkt die Neuerscheinung ab dem ersten Verkaufstag veraltet.

Dennoch gibt das Buch dem Leser das Rüstzeug, um die derzeitigen Entwicklungen besser zu verstehen. Der Autor wird in einer zweiten Auflage wahrscheinlich nicht darum herkommen, sein Werk um die aktuellen Geschehnisse zu erweitern.

Stefan Gillessen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.

GESCHICHTE WIE DIE ANTIKE UNS PRÄGT

Von beeindruckenden Bauwerken bis zu naturwissenschaftlichen Erkenntnissen: Bereits vor Jahrtausenden gelangen Menschen erstaunliche Leistungen, die uns noch heute beeinflussen.

Seit Jahrtausenden forscht und entwickelt der Mensch Technologien, um die Natur zu begreifen, die Umwelt zu gestalten und sich das Leben zu erleichtern. Viele Erkenntnisse und Errungenschaften, die aus der Antike stammen, bilden die

Grundlage moderner Technik, während andere untergingen.

Der Historiker Holger Sonnabend stellt den Forschungsstand in der Antike sowie die Geschichte von einigen Technikdisziplinen, die heute floriieren, vor. Darunter fallen insbesondere die Gebiete Ingenieurwesen und Architektur, aber auch theoretische Grundlagenforschung.



In 21 verschiedenen Themenblöcken präsentiert der Autor jeweils einen herausragenden Spezialisten der damaligen Zeit. Die Kapitelüberschriften lesen sich wie das Vorlesungsverzeichnis einer modernen Hochschule: Automatenherstellung, Mathematik, Signaltechnik oder Stadtplanung, um nur ein paar zu nennen. Zugleich stellen die ausgewählten Vertreter ihrer Kunst das »Who's who« der antiken Welt mit Philosophen, Erfindern und Herrschern dar.

Die Kapitelinhalte lassen sich in verschiedene Bereiche gliedern, oft mit naturwissenschaftlich-technischem Bezug, das etwa Bauwerke wie Tunnel oder Kanäle umfasst. Erstaunlich modern erscheinen dabei die gigantischen Landschaftsgestaltungsprojekte der Antike, die bisweilen megalomane Fantasien blieben, in manchen Fällen aber sogar realisiert wurden. Neben diesen manifestierten Leistungen – einige Bauwerke sind noch in Verwendung – enthalten die Abschnitte naturwissenschaftliche Untersuchungen, wie zur Meteorologie oder Geografie. Dann gibt es Passagen, die sich mit angewandten und theoretischen Studien auf Gebieten der Mathematik, (Atom-) Physik oder Kriegswesen und Landwirtschaft befassen.

Ohne eine gewisse Einschränkung hätte dieser Technik-Almanach bestimmt den Rahmen gesprengt. Der Autor begrenzt die Epoche jedoch von zirka 700 v. Chr. bis etwa 400 n. Chr. und steckt das beschriebene Gebiet durch die Anrainer des Mittelmeers ab.

Bei den Kulturen beschränkt er sich auf die hellenistische Welt und das Römische Reich. Die Wahl ist dabei sehr gelungen, in seinem Werk präsentiert der Verfasser amüsante und weit reichende Beispiele.

Als Historiker bleibt Sonnabend den schriftlichen Quellen treu. Der primäre Fundus der Kapitel sind antike Texte und Bücher, nur in einem zweiten Schritt bezieht er sich auf archäologische Funde.

Geschickt gelingt es ihm, die geschichtlichen Darstellungen lebendig wiederzugeben, wodurch diese gleichzeitig einen Bezug zur antiken und modernen Lebenswelt erhalten: Zum Beispiel waren verkehrsberuhigte Innenstädte mit einem klugen Brandschutzkonzept in der Antike essenzielle Forderungen einer urbanen Gesellschaft. Ebenso gab es damals schon Bedenken, ob neue Technologien und Maschinen gering qualifizierte Arbeitsplätze gefährden.

Manche ausgewählte Begebenheiten dürfte dem geschichtlich Interessierten bekannt sein, doch vieles ist sicherlich neu und spannend. Zugleich finden sich unter den vorgestellten Persönlichkeiten auch solche, die man nicht mit einer Expertise auf dem genannten Gebiet in Verbindung gebracht hätte.

Die verschiedenen Abschnitte sind gut lesbar und verständlich geschrieben, dabei ist die bisweilen trockene Technikgeschichte mit feinem Humor unterlegt. Gekonnt bettet Sonnabend die technische Materie in die geschichtlichen Zusammenhänge ein, wo eine ungemaine Abrundung gelingt – weder ist ein Kapitel zu historisch noch zu technisch. Es stört nicht, dass das Buch keine Abbildungen enthält.

Robin Gerst ist Archäologe und wirkte an der Konzeption des Besucherzentrums »Paläon« in Niedersachsen mit.



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 3.000 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

www.academia-net.org

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

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

URZEITRESTE ALS LUKRATIVES DÜNGEMATERIAL

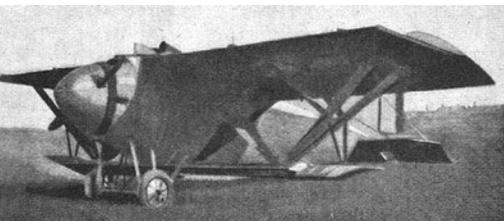
1921

»In den Kriegsjahren hat man in Österreich Höhlen wissenschaftlich erforscht und eine Entdeckung gemacht, die auch wirtschaftlich von großer Bedeutung sein kann. Man hat im Höhlenboden der Salzburger Alpen Höhlendünger entdeckt. Dieser stammt aus vorgeschichtlichen Fäkalien und Knochenablagerungen, die meist von meterhohen Schichten jahrhundertealten Fledermausguanos bedeckt sind. Diese Mengen sollen so groß sein, daß »schon die Förderung eines Bruchteils hinreichen würde, um die gesamten Kriegsschulden Österreichs zu decken. Die Drachenhöhle bei Murnitz (Steiermark) allein läßt einen Ertrag von mehr als 15 Millionen Kilo reiner Phosphorsäure im Wert von mindestens 450 Millionen Kronen erwarten.« *Kosmos 3, S. 79*

TELESKOPFLÜGEL DROSSELN GESCHWINDIGKEIT

»So wünschenswert die Steigerung der Fluggeschwindigkeit ist, so nötig ist ihre Verringerung bei Landungen, Beobachtungen und photographischen Aufnahmen. Dieses Ziel erreicht jetzt ein französischer 1½-Decker. Das Besondere der Bauart liegt in dem Tragdeck, dessen Größe sich verändern läßt. Es besteht aus drei Teilen, deren mittlerer fest ist, während der obere und untere sich gleitend darüber hinbewegen. Ganz ausgezogen ist es

Die Tragfläche ist ausziehbar.



3,28 m breit und hat 52 m², zusammen geschoben 1,60 m und 32 m². Es erreicht im ersteren Fall eine Geschwindigkeit von 200 Stundenkilometer, im andern nur 60.«

Die Umschau 13, S. 157

KEIN ALKOHOL AUF LEEREN MAGEN

»Der englische Arzt Dr. H. M. Vernon legte dar, wie bei Selbstversuchen die Zahl der beim Maschinenschreiben gemachten Fehler verschieden ausfiel je nach der Zeit, zu der er Alkohol zu sich genommen hatte. Nahm er unmittelbar nach dem Essen, so machte er nur 1,8 v. H. [von Hundert] Fehler über das gewöhnliche Maß; nahm er die Gabe 3½ Stunden nach dem Essen, so erhob sich die Fehlerzahl auf 7,6 v. H. Diese Versuche bestätigen die alte Wahrheit von der Nachteiligkeit des Trinkens auf leeren Magen.« *Die Umschau 12, S. 145*

WIE DER URKONTINENT AUSEINANDERBRACH

1971

»Eine neue Theorie der Kontinentaldrift geht von einem schon 1929 von *Wegener* angenommenen Urkontinent Pangaea aus, der noch im Perm vor etwa 225 Millionen Jahren existiert haben soll. In den nachfolgenden geologischen Perioden müßte diese Landmasse dann stufenweise auseinandergedriftet sein. Am Ende der Trias existierten schon vier kontinentale Platten: Laurasia, West-Gondwana, Indien und der Rest von Ost-Gondwana (Antarktis und Australien). Im Jura öffneten sich der Nordatlantik und der Indische Ozean. Gegen Ende trennte ein Rift West-Gondwana in zwei Teile: S-Amerika und Afrika. Die Aufspaltung von Gondwana war Ende der Kreidezeit komplett. Um die Wende Kreide/Känozoikum [waren] N-Amerika und Eurasien selbständige Kontinente. Afrika bewegte sich nach Norden; Indien stieß in den Südrand von Asien. [Nun waren es] sieben kontinentale Platten.«

Die Umschau 5, S. 176

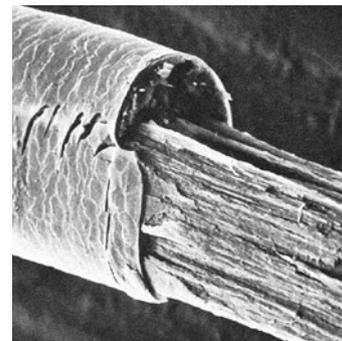
KÖNNEN SCHIMPANSEN SPRECHEN?

»Der Psychologe D. Premack von der Universität von Kalifornien (Santa Barbara) hat einer Schimpansin eine Symbolsprache gelehrt. Das Versuchstier Sarah besitzt ein Arbeitsvokabular von über 120 Wörtern. Sarah kann nicht nur die Bedeutung dieser Wörter verstehen, sondern auch Fragen beantworten und eigene Sätze bauen. Auf der Grundlage einer relativ kurzen Arbeitsperiode von zwei Jahren mit einer einzigen Schimpansin beansprucht Premack, daß Sarah eine ihr eigene, brillante Leistungsfähigkeit besitzt, was jedoch nicht bedeutet, daß die Schimpansin zu sämtlichen Funktionen der Sprache befähigt ist.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 13, S. 118–119*

KABEL IM HAAR

»Wie auf so vielen Gebieten, hat das Rasterelektronenmikroskop auch neue Einblicke in die Struktur des Haares ermöglicht. Man erhält ein tiefenscharfes dreidimensionales Bild. Der Blick ins Haarinnere macht deutlich, wie Kabel und Kabelstränge in eine amorphe Substanz (Kitt) eingebettet sind. [Damit] wird die frühere Vorstellung vom Aufbau aus Spindelzellen außer Kurs gesetzt. Dafür sieht man eine Vielzahl sehr langer, dünner Fasern.« *Die Umschau 5, S. 213*

Haar im Rasterelektronenmikroskop bei 950-facher Vergrößerung.



Die Umschau 5, S. 213

HINDERLICHE HIERARCHIEN

Der Neurologe Ulrich Dirnagl beschrieb das Problem methodischer Mängel in vielen biomedizinischen Studien – und Gegenmaßnahmen. (»Kulturwandel in der Biomedizin«, »Spektrum« Oktober 2020, S. 38)

Dieter Zeller, per E-Mail: Im Artikel werden zwei wichtige Aspekte nicht erwähnt: Da ist erstens die Wirkung der immer noch ausgeprägten hierarchischen Struktur der universitären Medizin, verbunden mit den zum Teil prekären Arbeitsverhältnissen junger Forscher. Zweitens befinden sich Mediziner in einer kommunikativen »Blase«. Ich erfuhr zum Beispiel 1982 durch Zeitungslektüre von der Entdeckung des *Helicobacter pylori* und den Konsequenzen für die Behandlung von Gastritis oder Magengeschwüren. 1986 brüllte mich noch ein chirurgischer Oberarzt zusammen, als ich angesichts eines bevorstehenden Eingriffs vorschlug, vorher eine Untersuchung auf *H. pylori* zu veranlassen. Ab 1989 berichteten mir dieselben Kollegen, die beim Schreianfall des Vorgesetzten betreten geschwiegen hatten, begeistert von den revolutionären Neuerungen bei der Gastritis-Therapie.

Ich weiß auch nicht, wie das geändert werden kann. Vielleicht würde ein konsequenter Abbau der aus dem vorletzten Jahrhundert stammenden Hierarchien helfen, vielleicht wäre auch hilfreich, wenn Mediziner in ihrer Ausbildung mehr über Wissenschaftstheorie lernten.

EIN BEGRIFF ZU WENIG, EINER ZU VIEL

Laut der unbeweisbaren Kontinuumshypothese gibt es keine Menge, die größer als die natürlichen und kleiner als die reellen Zahlen ist. Mathematiker versuchen, die Mengenlehre durch sinnvolle Annahmen zu ergänzen, aus denen eindeutig folgt, ob die Aussage wahr oder falsch ist. (»Das fehlende Puzzleteil«, »Spektrum« Februar 2021, S. 12)

Ralf Medow, per E-Mail: Ich freue mich, dass ein mathematisches Thema ausführlich behandelt wird, dazu noch so, dass auch ein Nichtmathematiker vielen Aspekten folgen kann. Zwei Dinge kommen mir allerdings merkwürdig vor: Bei der Definition des Auswahlaxioms steht: »Es besagt, dass für eine Sammlung nichtleerer Mengen immer eine Menge existiert, die genau ein Element mit jeder der Mengen gemeinsam hat.« Beim Versuch, dies nachzuvollziehen, ist mir prompt ein Gegenbeispiel eingefallen: Die Sammlung enthalte die drei zweielementigen Mengen $A = \{1, 2\}$, $B = \{1, 3\}$ und $C = \{2, 3\}$. Für die Konstruktion der vorhergesagten Menge kann ich mit $\{1\}$ beginnen, was zu A und B passt, aber C fehlt noch. Ich muss 2 oder 3 ergänzen, damit C dabei ist, aber dann hat die konstruierte Menge mit A oder B zwei Elemente gemeinsam, also nicht genau eines wie gefordert beziehungs-

Leserbriefe sind willkommen!

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

weise vorhergesagt. Aus Symmetriegründen hilft es nicht, mit 2 oder 3 zu beginnen. Ein Blick in die Wikipedia liefert zunächst eine andere Definition des Auswahlaxioms, aber unter »Alternative Formulierungen« findet sich: »Sei A eine Menge von paarweise disjunkten nicht leeren Mengen X_i . Dann gibt es eine Menge C , die mit jedem X_i genau ein gemeinsames Element hat.« Kann es sein, dass Sie in Ihrem Artikel das »paarweise disjunkt« vergessen haben?

Außerdem steht auf S. 17: »Man kann sie ausgehend von der leeren Menge \emptyset konstruieren, indem man immer wieder die Potenzmengen-Operation anwendet.« Die angegebene Regel von n nach $n + 1$ ist aber gar nicht die Potenzmenge.

Antwort der Redakteurin Manon Bischoff: Tatsächlich fehlt im Artikel die Erwähnung der paarweisen Disjunktheit. Auch beim zweiten Punkt waren Sie aufmerksam – die Potenzmengen-Operation steht dort fälschlicherweise. Die Anzahl der Elemente einer Potenzmenge entspricht immer zwei hoch der Zahl der Ausgangsmenge.

EISKRYSTALLE UNTER DRUCK

Kolumnist H. Joachim Schlichting berichtete von Abdrücken im Schnee, die sich zu kreisförmigen Strukturen entwickeln. (»Geheimnisvolle Spuren im Schnee«, »Spektrum« Januar 2021, S. 64)

Martin Treiber, Dresden: Die Annahme, dass Schneebälle durch den Druck teilweise schmelzen, kann ich nicht nachvollziehen. Pro 1000 Hektopascal erniedrigt sich der Gefrierpunkt um etwa 0,0075 Kelvin. Verrechnet man das mit der Schmelzenthalpie, ergibt sich nur eine minimale Menge zusätzlichen Wassers. Natürlich kann es beim Ballen von Schnee tropfen. Das ist aber lediglich die bereits enthaltene Flüssigkeit, welche herausgepresst wird.

Antwort des Autors H. Joachim Schlichting: Das Druckschmelzen passiert nicht global, sondern an einigen Stellen, an denen Spitzen der Eiskristalle (sehr kleine Flächen) aufeinanderstoßen. Dabei entstehen hohe Drücke, und es finden Schmelzvorgänge statt, die zu einem lokalen Zusammenfriren führen, sobald der Druck wieder nachlässt. Man hat es mit Sinterprozessen zu tun. Aber das zu erläutern hätte an der Stelle zu weit geführt.

Die erste Lektion

Einblicke in den modernen Strafvollzug.

Eine Kurzgeschichte von Ninan Tan

Die Pflegerin betritt das Wartezimmer mit einer einladenden Geste. »Mr. Smith? Ihr Panikraum ist vorbereitet.«

Ich werfe die Illustrierte zurück auf den Tisch mit den ausgelegten Zeitschriften, springe sportlich auf und greife nach meiner Aktentasche. Die Pflegerin schenkt mir ein höfliches Lächeln, während ich ihr durch einen langen Korridor mit zahlreichen Türen folge. Die wie von dicken Wattekissen gedämpften Schreie eines Mannes lassen mich zusammenzucken.

»Sind Sie zum ersten Mal bei uns?« fragt die Pflegerin.

»Ja. Gibt es etwas, was ich vorher wissen sollte?«

»Es besteht kein Grund zur Beunruhigung, Mr. Smith.

Unsere professionell geschulten Mitarbeiter werden dafür sorgen, dass Ihre Sitzung glatt und ohne Probleme verläuft.«

Als wir schon fast die Tür zu meinem Raum erreicht haben, werde ich auf ein Handgemenge am anderen Ende des Korridors aufmerksam. Mein Herz schlägt bis zum Hals, als eine junge Frau, die hysterisch schreit, aus einem der Panikräume gezerrt wird.

»Wiederholungstäterin. Mehrfach verurteilt«, bemerkt die Pflegerin, während sie meine Tür aufschließt.

»Tut es weh?«

»Das hängt ganz von der Straftat ab«, erklärt die Pflegerin und führt mich in den weißen, ausgepolsterten Raum. »Darf ich vorschlagen, dass Sie Ihre Anzugjacke ablegen, Mr. Smith?«

Ich schlüpfte aus dem Sakko und überreiche es ihr. Sie legt das Kleidungsstück sorgsam gefaltet über ihren Arm und wartet mit mir, bis ein Vollzugsbeamter zu uns in den Panikraum tritt. Er sieht mir nicht in die Augen, während er einen Helm mit elektronischen Kontakten auf meine Kopfhaut drückt. Mir dreht es vor Angst den Magen um.

»Sitzt das Headset auch nicht zu eng?« fragt der Vollzugsbeamte, während er das Kinnband strafft.

Ich mustere das Namensschild auf seiner Brust. »Es passt alles. Vielen Dank, Eric.«

Überrascht erwidert der Vollzugsbeamte zum ersten Mal meinen Blick. Anscheinend nehmen nur wenige von seinem Namen Notiz.

»Alles bestens, Mr. Smith«, beruhigt er mich. »Sobald wir den Raum verlassen und die Tür abschließen, folgt ein 30 Sekunden langer Countdown, und direkt anschließend beginnt Ihre Sitzung.«

»Ich verstehe.«

Die Pflegerin und der Vollzugsbeamte verlassen den Raum. Hinter ihnen fällt die Tür ins Schloss: das Startsignal zu den längsten 30 Sekunden meines Lebens.

Am Ende des Countdowns erwacht das Headset zum Leben, und ich bin nicht mehr im Panikraum. Stattdessen finde ich mich auf einer Straße in Brooklyn wieder. Es herrscht Nacht, und die Pfützen eines nachmittäglichen Wolkenbruchs sprenkeln das Pflaster. Ich höre einen Rettungswagen, der mit ohrenbetäubendem Heulen vorbeirast. Als ich tief Luft hole, inhaliere ich den Geruch von feuchtem Zement und nassem Müll. Ich fröstle unter einem Windstoß und stelle den Mantelkragen auf.

Ich gehe um die nächste Ecke, und während ich die paar Stufen zum Eingang eines vor dem Krieg errichteten Hauses aus braunem Sandstein hinaufsteige, suche ich in den Manteltaschen nach den Schlüsseln. Im Innern sieht das Haus kürzlich renoviert aus, ganz nach modernem Geschmack. Eine höchst attraktive Blondine in einem langen blauen Kleid schwebt die Treppe herab, mir entgegen. Bei ihrem Anblick überwältigt mich eine Welle der Anbetung.

»Robert. Da bist du ja«, sagt sie zärtlich. »Ich dachte, heute würde es wieder so spät werden wie sonst immer.«

»Das konnte ich nicht zulassen. Nicht an unserem Hochzeitstag«, antworte ich. Aber das ist nicht meine Stimme! So spricht dieser Robert. Ich zaubere einen Blumenstrauß hervor und überreiche ihn ihr.

»Ach Robert, mein Liebster.« Sie nimmt mir die Blumen ab und drückt ihre weichen Lippen sanft auf meinen Mund.

Es klingelt.

»Wer mag das denn sein, um diese Zeit?« murmelt sie.

Ich öffne die Tür, und ein Gemisch aus Überraschung und böser Vorahnung raubt mir den Atem. Auf der Schwelle erblicke ich – Simon Smith.

»Mr. Smith? Was haben Sie vor meinem Haus verloren? Ich finde, zwischen uns gibt es nichts mehr zu besprechen.«

Simon Smith sagt kein Wort. Aber der irre Blick seiner blutrot unterlaufenen Augen unter der tief ins Gesicht gezogenen Hutkrempe ist deutlich genug. Seine Hände stecken tief in den Manteltaschen, zitternd und zu Fäusten geballt.

Ich räuspere mich unbehaglich und schlucke mit trockenem Mund.

»Robert, wer ist das?«, fragt die Frau hinter mir.

Ich schaue über die Schulter zu ihr hin. »Alles in Ordnung, Vanessa. Ich kümmere mich darum.«

Da weiten sich ihre Augen vor Entsetzen, und zugleich jagt ein nie gekannter Schmerz durch meinen Unterleib. Ich blicke hinunter auf den Messergriff, der

aus meinem Bauch ragt. Augenblicklich ist mein weißes Hemd mit Blut getränkt. Ich sinke zu Boden. Vanessas Schreie versetzen mich in äußerste Panik. Furcht, Verwirrung und Hass überwältigen alle meine Sinne, während ich versuche, Simon Smith zu fixieren, meinen Mörder. Der Schmerz wird immer heftiger. Gezackte weiße Blitze schießen durch mein Gesichtsfeld, bis mir schließlich schwarz vor Augen wird.

Ich komme wieder zu mir, nach Atem ringend. Das Türschloss klickt, der Vollzugsbeamte und die Pflegerin betreten den Panikraum. Der Vollzugsbeamte kniet neben mir nieder und nimmt mir den Helm vom Kopf. Mein Herz schlägt noch immer wie verrückt. Ich versuche, mein Zittern zu bändigen.

»Sie haben Ihre erste Sitzung beendet, Mr. Smith«, erklärt der Vollzugsbeamte. »Das Ganze hat insgesamt 3 Minuten und 17 Sekunden gedauert.« Er packt meinen Arm und hilft mir, vom Boden aufzustehen. Mein Hemd ist von Schweiß durchnässt. »Das erste Mal ist erfahrungsgemäß ein besonders einschneidendes Erlebnis. Aber nur keine Sorge. Ihr Nervensystem wird sich allmählich an das Rehabilitationsprogramm gewöhnen.«

Die Pflegerin hebt meine Aktentasche auf und schlingt ihren freien Arm um meinen. Sie stützt mich auf dem ganzen Weg aus dem Panikraum heraus und bis zur Rezeption im Vorzimmer.

Die Empfangsdame überreicht mir eine Quittung für die Sitzung. »Mr. Smith«, beginnt sie förmlich. »Wie vom

Gesetz verlangt bin ich verpflichtet, Sie nach jeder Sitzung daran zu erinnern, warum Sie hier sind: Sie wurden verurteilt für den Mord an einem gewissen Robert Clement am 10. Oktober 2051. Die Strafe besteht darin, dass Sie den vorgenannten Mord aus der Perspektive des Opfers erleben, und zwar wöchentlich einmal, Woche für Woche, 25 Jahre lang. Gegenwärtig haben Sie noch 1299 Sitzungen zu absolvieren.«

Hinter mir hat die Pflegerin nicht aufgehört zu lächeln. »Danke, dass Sie unsere private Strafvollzugs- und Rehabilitationsanstalt Clarion Correctional Facilities gewählt haben, Mr. Smith. Wir freuen uns darauf, Sie nächste Woche wiederzusehen. Bitte vergessen Sie nicht, unseren Fragebogen zur Kundenzufriedenheit auszufüllen; dadurch nehmen Sie automatisch an einem Wettbewerb teil, der Ihnen die Chance eröffnet, für die künftigen Sitzungen in einer unserer Luxussuiten abzustiegen. Wir wünschen Ihnen einen guten restlichen Tag.« ◀

DIE AUTORIN

Ninan Tan lebt als Filmmacherin und Sciencefiction-Autorin in New York, Rom und Peking.

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 535, S. 318, 2016

Spektrum der Wissenschaft

Chefredaktion: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Janosch Deeg, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang;

E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkte mit: Dr. Michael Springer

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

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,-; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,-. PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

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

Auflageteilen liegt Werbung von Plan International Deutschland e.V. und der Grüner Fisher Investments GmbH bei.

Anzeigen: E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-600

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 42 vom 1.1.2021.

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: © 2021 (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
Vice President Magazines: Stephen Pincock



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



VORSCHAU



EMIT-POLOSKUN / BETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

WAS IST EIN TEILCHEN?

Zur grundlegenden Natur der kleinsten Bausteine der Welt gibt es zahlreiche Hypothesen: Es könnten punktförmige Objekte sein, schwingende Felder oder Einblicke in eine mathematische Ordnung des Kosmos. Physiker ringen seit Jahrzehnten um das sinnvollste Konzept – heute intensiver als je zuvor. So viel ist klar: Erst eine Theorie, die Quantenmechanik und Gravitation auf fundamentalen Skalen vereinigt, wird das Rätsel lösen.



LEILA MELHADO / BETTY IMAGES / ISTOCK

MIT BIOENERGIE DAS KLIMA RETTEN?

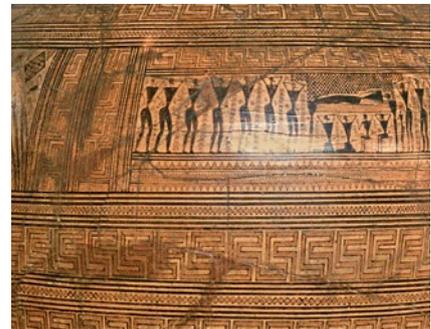
Bäume, Sträucher und Gräser, aus denen Kraftstoff oder Strom erzeugt wird, sollen helfen, den Klimawandel zu bremsen. Aber das dafür benötigte Ackerland dient bereits der Nahrungsmittelproduktion und als Weideland. Auch Wälder wären gefährdet, weil sie durch ertragreiche Monokulturen ersetzt werden würden.



CHONNESS / GETTY IMAGES / ISTOCK

EINE NEUE MATHEMATIK DER ZEIT

Den Gesetzen der Physik zufolge ist der Lauf der Zeit eine Illusion. Um diesen scheinbaren Widerspruch zu umgehen, muss man das mathematische Konzept der Unendlichkeit überdenken.



HENRIE CHAMPOLLION / AGC-IMAGES / PICTURE ALLIANCE

BEGANN DIE ANTIKE FRÜHER?

Laut Lehrmeinung traten die Gesellschaften Griechenlands im 8. Jahrhundert v. Chr. aus dem Schatten der »Dunklen Jahrhunderte« hervor. Doch zwei Forscher fechten diese Zeiteinteilung an – mit Hilfe der ¹⁴C-Methode.

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)

Verpassen Sie keine Ausgabe!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!



ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,-), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



KOMBIABO:

Für nur € 6,-/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



Spektrum PLUS:

Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserexkursionen und Redaktionsbesuche.

Jetzt bestellen!

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

www.spektrum.de/abo

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **50**
15.12.
2020

TRAUER
Gestorben ohne Abschied

THEMENWOCHE **LEBEN MIT DEM TOD**

Wie wollen wir sterben?

Der Tod ist ein Tabuthema. Dabei kennt die moderne Medizin Mittel und Wege, ihn erträglich zu machen. Und die Bedürfnisse des Einzelnen am Lebensende zu erfüllen.

TRAUMA
»Alle schweren Erkrankungen können zu einer PTBS führen«

GEFÜHLTE RISIKEN
Die Angst um die Liebsten

LETZTE HILFE
Wie sorge ich für einen Sterbenden?

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung.

Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.

www.spektrum.de/abonnieren

